

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-141553

(P2002-141553A)

(43) 公開日 平成14年5月17日 (2002. 5. 17)

(51) Int. Cl. ⁷	識別記号	F I	テームコード (参考)
H 0 1 L 33/00		H 0 1 L 33/00	C 5 F 0 4 1
H 0 1 S 5/343	6 1 0	H 0 1 S 5/343	6 1 0 5 F 0 7 3

審査請求 未請求 請求項の数39 O L (全 28 頁)

(21) 出願番号 特願2001-282288(P2001-282288)
 (62) 分割の表示 特願平8-36250の分割
 (22) 出願日 平成8年2月23日 (1996. 2. 23)
 (31) 優先権主張番号 5 6 5 1 0 1
 (32) 優先日 平成7年11月30日 (1995. 11. 30)
 (33) 優先権主張国 米国 (U S)
 (31) 優先権主張番号 特願平7-34924
 (32) 優先日 平成7年2月23日 (1995. 2. 23)
 (33) 優先権主張国 日本 (J P)
 (31) 優先権主張番号 特願平7-89102
 (32) 優先日 平成7年4月14日 (1995. 4. 14)
 (33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000226057
 日亜化学工業株式会社
 徳島県阿南市上中町岡491番地100
 (72) 発明者 中村 修二
 徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化学工業株式会社内
 (72) 発明者 長瀬 慎一
 徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化学工業株式会社内
 (74) 代理人 100058479
 弁理士 餘江 武彦 (外5名)

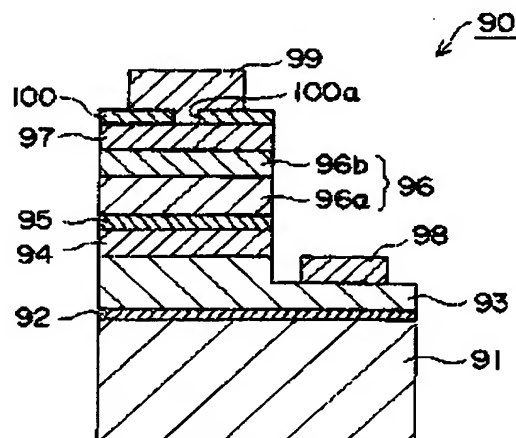
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 窒化物半導体発光素子

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 発光出力が高く、発光スペクトルの半値幅が狭い窒化物半導体発光素子が提供される。

【解決手段】 活性層95を量子井戸構造とする。活性層95上に設けられるp型クラッド層96のうち、第1のp型クラッド層96aをアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成し、第2のp型クラッド層96bを同様のp型窒化物半導体であるが、第1のp型クラッド層96bよりもバンドギャップの大きいもので形成する。



特開2002-141553

(2)

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、

該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつn型In, Ga, N (ここで、 $0 < j < 1$) からなる第1のn型クラッド層、

該第1のn型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型AlbGa1-bN (ここで、 $0 < b < 1$) からなる第2のn型クラッド層、

該第2のn型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型GaNからなるn型コンタクト層、および該活性層の第2の主面に接して設けられたp型窒化物半導体層を備えることを特徴とする窒化物半導体発光素子、

【請求項2】 p型窒化物半導体層が、活性層の第2の主面に接して設けられたp型窒化物半導体からなるp型クラッド層と、該p型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられたp型GaNもしくはAlGaNからなるp型コンタクト層を含むことを特徴とする請求項1に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項3】 活性層と第1のn型クラッド層とが、合計で300オングストローム以上の厚さを有することを特徴とする請求項1または2に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項4】 第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、

該活性層の第1の主面に接して設けられたn型窒化物半導体層、

該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつp型In, Ga, N (ここで、 $0 \leq x < 1$) からなる第1のp型クラッド層、

該第1のp型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型Al, Ga, N (ここで、 $0 < b < 1$) からなる第2のp型クラッド層、

該第2のp型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型GaNもしくはAlGaNからなるp型コンタクト層を備えることを特徴とする窒化物半導体発光素子、

【請求項5】 n型窒化物半導体層が、活性層の第1の主面に接して設けられたn型In, Ga, N (ここで、 $0 \leq w < 1$) からなる第1のn型層を含むことを特徴とする請求項4に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項6】 n型窒化物半導体層が、第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられたn型GaNからなるn型コンタクト層を含むことを特徴とする請求項5に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項7】 n型窒化物半導体層が、第1のn型クラッド層とn型コンタクト層との間にn型Al, Ga, N (ここで、 $0 < a < 1$) からなる第2のn型クラッド層をさらに備えることを特徴とする請求項6に記載の窒化物半導体発光素子、

2

N (ここで、 $0 < a < 1$) からなる第2のn型クラッド層をさらに備えることを特徴とする請求項6に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項8】 活性層と第1のp型クラッド層とが、合計で300オングストローム以上の厚さを有することを特徴とする請求項4ないし7のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項9】 活性層と第1のn型クラッド層とが、合計で300オングストローム以上の厚さを有することを特徴とする請求項5ないし8のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項10】 第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に接して設けられたn型窒化物半導体層、

該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体からなる第1のp型クラッド層、

該第1のp型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、該第1のp型層よりも大きなバンドギャップを有し、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体からなる第2のp型クラッド層、および該第2のp型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型GaNもしくはAlGaNからなるp型コンタクト層を備えることを特徴とする窒化物半導体発光素子、

【請求項11】 n型窒化物半導体層が、活性層の第1の主面に接して設けられ、n型InGaN, GaNもしくはAlGaNからなるn型クラッド層を含むことを特徴とする請求項10に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項12】 n型窒化物半導体層が、n型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型GaNからなるn型コンタクト層を含むことを特徴とする請求項11に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項13】 第1のp型クラッド層が、10オングストロームから1.0μmまでの厚さを有することを特徴とする請求項10ないし12のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項14】 n型クラッド層が、100オングストロームから1μmまでの厚さを有することを特徴とする請求項11ないし13のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子、

【請求項15】 第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、

該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつIn, Ga, N (ここで、 $0 < r < 1$) からなる第1のn型クラッド層、

該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつ該第1のn型クラッド層よりも大きなバ

(3)

特開2002-141553

3

4

ンドギャップを有するn型窒化物半導体からなる第2のn型クラッド層。

該第2のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Ga_{0.5}Nからなるn型コンタクト層、および該活性層の第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を備えることを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項16】 p型窒化物半導体がp型AlGa_{0.5}Nからなるp型クラッド層と、p型AlGa_{0.5}NもしくはGa_{0.5}Nからなるp型コンタクト層を含むことを特徴とする請求項15に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項17】 第1のn型クラッド層が、100オングストローム以上の厚さを有することを特徴とする請求項15または16に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項18】 第2のn型クラッド層が、500オングストローム以上の厚さを有することを特徴とする請求項15ないし17のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項19】 pクラッド層が、1000オングストローム以上の厚さを有することを特徴とする請求項16ないし18のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項20】 第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、該第1のp型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有し、かつアルミニウムとガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項21】 第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_{0.5}Nよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつ該第1のn型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有する第2のn型クラッド層とを含み、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも活性層から離れ

た位置に設けられ、該第1のp型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有し、かつアルミニウムとガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項22】 第1のn型クラッド層が、100オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする請求項21に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項23】 第1のp型クラッド層が、100オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする請求項20ないし22のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項24】 第1の主面および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_{0.5}Nまたはよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Ga_{0.5}Nまたはアルミニウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体よりなる第2のn型クラッド層とを含み、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型Ga_{0.5}Nまたはインジウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含み、該第1のp型クラッド層は、100オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項25】 活性層が、厚さ1000オングストローム以下の井戸層からなる単一量子井戸構造を構成することを特徴とする請求項1ないし24のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項26】 活性層が、インジウムおよびガリウムを含む窒化物半導体よりなる井戸層と窒化物半導体よりなる障壁層とを積層してなる多量量子井戸構造を構成することを特徴とする請求項1ないし24のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項27】 活性層が、ノンドープのものである請求項1ないし26のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項28】 第1の主面および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主

(4)

特開2002-141553

5

面に接して設けられ、かつアルミニウムを含まないn型の窒化物半導体よりなる第1のn型クラッド層を含み、該p型窒化物半導体層は、アルミニウムを含まないp型の窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも該活性層から離れた位置に設けられ、かつアルミニウムおよびガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含み、さらに該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に形成されたn型Ga_{0.5}Nよりなるn型コンタクト層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項29】 第1の主面および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつアルミニウムを含まないn型の窒化物半導体よりなる第1のn型クラッド層を含み、該p型窒化物半導体層は、アルミニウムを含まないp型の窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも該活性層から離れた位置に設けられ、かつアルミニウムおよびガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含み、さらに該第2のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に形成されたp型Ga_{0.5}Nよりなるp型コンタクト層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項30】 活性層と第1のn型クラッド層とが、合計で300オングストローム以上の厚さを有することを特徴とする請求項28または29に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項31】 n型窒化物半導体層が、第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に形成され、かつアルミニウムとガリウムとを含むn型の窒化物半導体よりなる第2のn型クラッド層をさらに含むことを特徴とする請求項28ないし30のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項32】 活性層と第1のn型クラッド層と第1のp型クラッド層とが、合計で300オングストローム以上の厚さを有することを特徴とする請求項28ないし31のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項33】 第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_{0.5}Nよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、該第1のn型クラッド層よ

6

りも大きなバンドギャップを有する第2のn型クラッド層とを含み、さらに、該p型窒化物半導体は、p型Ga_{0.5}Nよりなるp型コンタクト層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項34】 第1のn型クラッド層が、10オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする請求項33に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項35】 第1の主面および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_{0.5}Nまたはよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Ga_{0.5}Nまたはアルミニウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体よりなる第2のn型クラッド層とを含み、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層を含み、該第1のp型クラッド層は、10オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項36】 第1および第2の主面を有し、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体よりなる量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、

該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_{0.5}Nよりなる第1のn型クラッド層を含み、

該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して形成され、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型層、および該第1のp型層よりも活性層から離れた位置に設けられたp型Ga_{0.5}Nよりなる第2のp型層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項37】 活性層が、厚さ100オングストローム以下の井戸層からなる単一量子井戸構造を構成することを特徴とする請求項28ないし36のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項38】 活性層が、インジウムおよびガリウムを含む窒化物半導体よりなる井戸層と窒化物半導体よりなる障壁層とを積層してなる多量量子井戸構造を構成することを特徴とする請求項28ないし36のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

(5)

特開2002-141553

7

8

【請求項39】 活性層が、ノンドープのものである請求項28ないし38のいずれか1項に記載の窒化物半導体発光素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、発光ダイオード（LED）、レーザダイオード（LD）等の半導体発光素子に係り、特に、基板上に積層される半導体層構造が窒化物半導体により構成される窒化物半導体発光素子に発光素子に関する。

【0002】

【従来の技術】紫外から赤色領域までの波長領域に発光するLED、LD等の半導体発光素子の材料としてInGa_N、AlGa_N、Ga_N等の窒化物半導体が有望視されている。現在、これら窒化物半導体材料で構成された青色LED、青緑色LEDが実用化され、ディスプレイ、信号等に用いられている。

【0003】これらの青色、青緑色発光窒化物半導体LED素子は、ダブルヘテロ構造を有し、基本的には、基板の上に、n型Ga_Nよりなるn型コンタクト層と、n型AlGa_Nよりなるn型クラッド層と、n型InGa_Nよりなる活性層と、p型AlGa_Nよりなるp型クラッド層と、p型Ga_Nよりなるp型コンタクト層とが順次積層された構造を有している。活性層には、Si、Ge等のドナー不純物および/またはZn、Mg等のアクセプター不純物がドーパされている。このLED素子の発光波長は、活性層を構成するInGa_NのInの比率を変えるか、または活性層にドーパする不純物の種類を変えることにより、紫外から赤色領域まで変化させることができる。

【0004】他方、LD素子については、従来より種々の構造が提案されている。例えば特開平6-21511号公報には、分離閉じ込め型のLD素子が開示されている。このLD素子は、InGa_Nよりなる膜厚1000Å以下の活性層をn型Ga_N層とp型Ga_N層とにより挟持し、さらにn型Ga_N層およびp型Ga_N層のそれぞれの上にp型AlGa_N層およびn型AlGa_N層を設けた構造を有する。この素子において、AlGa_N層が光閉じ込め層として作用している。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】窒化物半導体LED素子については、上に述べたようなダブルヘテロ構造が実現されたことにより、発光出力は実用レベルまで向上するに至っている。しかしながら、LED素子であってもさらに高い発光出力を示す素子が望ましいばかりでなく、従来のLED素子においては、活性層（発光層）に不純物がドーパされているために、発光スペクトルの半値幅が広がるさじがある。発光スペクトルの半値幅が広いと、その発光色は白色味を帯びて見えるので、そのようなLED素子を用いて例えばフルカラーディス

プレイを作製した際には、そのカラーディスプレイの色再現領域が狭くなることとなる。

【0006】他方、窒化物半導体LD素子は、前記特開平6-21511号公報に記載されているように、ノンドープのInGa_Nで形成された活性層を有するダブルヘテロ構造により、理論的には、実現可能であるが、実際にはそのLD素子は発振するには至っていない。特にこの公報に記載されているように、活性層を量子井戸構造とすることにより、発光出力が大幅に向上するはずであるが、前述のように、実際はレーザ発振するに至っていない。

【0007】従って、本発明は、LED素子に適用した場合には、発光出力が高く、発光スペクトルの半値幅が狭いLED素子を実現でき、またLD素子に適用した場合には、現実のレーザ発振を行えるLD素子を実現できる新規な構造の窒化物半導体発光素子を提供することを課題とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】本発明者らは、活性層をp型半導体層とn型半導体層で挟持した構造の窒化物半導体発光素子について鋭意研究した結果、活性層をInGa_Nで形成するとともに、これを量子井戸構造（単一量子井戸および多重量子井戸構造の双方を含む）とすることによって当該活性層からの発光をInGa_Nのバンド間発光に基づくものとすることができ、もって半値幅の狭い発光を得ることができると、および特定のp型層またはn型層を当該活性層に接して設けることによって、高い発光出力を示すおよび/または現実のレーザ発振を行える窒化物半導体発光素子が得られることを見いだした。これらの知見に基づいてさらに研究を進め、本発明を完成するに至った。

【0009】より具体的には、本発明の第1の側面によれば、第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつn型In_aGa_{1-a}N（ここで、0< a < 1）からなる第1のn型クラッド層、該第1のn型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Al_bGa_{1-b}N（ここで、0< b < 1）からなる第2のn型クラッド層、該第2のn型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Ga_Nからなるn型コンタクト層、および該活性層の第2の主面に接して設けられたp型窒化物半導体層を備えることを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0010】ここで、p型窒化物半導体層は、活性層の第2の主面に接して設けられたp型窒化物半導体からなるp型クラッド層と、該p型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられたp型Ga_NもしくはAlGa_Nからなるp型コンタクト層を含むことができる。また、活性層と第1のn型クラッド層とが、合計で300

(6)

特開2002-141553

9

10

オングストローム以上の厚さを有することが好ましい。

【0011】本発明の第2の側面によれば、第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に接して設けられたn型窒化物半導体層、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつp型In、Ga、N（ここで、 $0 \leq x < 1$ ）からなる第1のp型クラッド層、該第1のp型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型Al、Ga、N（ここで、 $0 < b < 1$ ）からなる第2のp型クラッド層、該第2のp型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型Ga、NもしくはAlGa、Nからなるp型コンタクト層を備えることを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【0012】ここで、n型窒化物半導体層が、活性層の第1の主面に接して設けられたn型In、Ga、N（ここで、 $0 \leq w < 1$ ）からなる第1のn型層を含むことができる。また、n型窒化物半導体層は、第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられたn型Ga、Nからなるn型コンタクト層を含むことができる。また、n型窒化物半導体層が、第1のn型クラッド層とn型コンタクト層との間にn型Al、Ga、N（ここで、 $0 < a < 1$ ）からなる第2のn型クラッド層をさらに備えることを特徴とする請求項6に記載の窒化物半導体発光素子。また、活性層と第1のp型クラッド層とが、合計で300オングストローム以上の厚さを有することが好ましく、活性層と第1のn型クラッド層とが、合計で300オングストローム以上の厚さを有することが好ましい。

【0013】本発明の第3の側面によれば、第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に接して設けられたn型窒化物半導体層、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体からなる第1のp型クラッド層、該第1のp型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、該第1のp型層よりも大きなバンドギャップを有し、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体からなる第2のp型クラッド層、および該第2のp型層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型Ga、NもしくはAlGa、Nからなるp型コンタクト層を備えることを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0014】ここで、n型窒化物半導体層は、活性層の第1の主面に接して設けられ、n型InGa、N、Ga、NもしくはAlGa、Nからなるn型クラッド層を含むことができる。また、n型窒化物半導体層は、n型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Ga、Nからなるn型コンタクト層を含むことができる。また、第1のp型クラッド層は、10オングストロームから1、000μmまでの厚さを有することが好ましく、n型

クラッド層は、100オングストロームから1μmまでの厚さを有することが好ましい。

【0015】さらに、本発明の第4の側面によれば、第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつIn、Ga、N（ここで、 $0 < r < 1$ ）からなる第1のn型クラッド層、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつ該第1のn型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有するn型窒化物半導体からなる第2のn型クラッド層、該第2のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Ga、Nからなるn型コンタクト層、および該活性層の第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を備えることを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0016】ここで、p型窒化物半導体は、p型AlGa、Nからなるp型クラッド層と、p型AlGa、NもしくはGa、Nからなるp型コンタクト層を含むことができる。また、第1のn型クラッド層は、10オングストローム以上の厚さを有することが好ましく、第2のn型クラッド層は、500オングストローム以上の厚さを有することが好ましい。さらに、pクラッド層は、100オングストローム以上の厚さを有することが好ましい。

【0017】本発明の第5の側面によれば、第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、該第1のp型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有し、かつアルミニウムとガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0018】本発明の第6の側面によれば、第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体またはn型Ga、Nよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつ該第1のn型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有する第2のn型クラッド層とを含み、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けら

(7)

特開2002-141553

11

れ、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、該第1のp型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有し、かつアルミニウムとガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0019】ここで、第1のn型クラッド層が、10オングストローム以上、1.0 μm 以下の厚さを有することが好ましく、第1のp型クラッド層は、10オングストローム以上、1.0 μm 以下の厚さを有することが好ましい。

【0020】本発明の第7の側面によれば、第1の主面および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_{0.5}Nまたはよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Ga_{0.5}Nまたはアルミニウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体よりなる第2のn型クラッド層とを含み、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型Ga_{0.5}Nまたはインジウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含み、該第1のp型クラッド層は、10オングストローム以上、1.0 μm 以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0021】本発明の第8の側面によれば、第1の主面および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつアルミニウムを含まないn型の窒化物半導体よりなる第1のn型クラッド層を含み、該p型窒化物半導体層は、アルミニウムを含まないp型の窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも該活性層から離れた位置に設けられ、かつアルミニウムおよびガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含み、さらに該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に形成されたn型Ga_{0.5}Nよりなるn型コンタクト層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

12

【0022】本発明の第9の側面によれば、第1の主面および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつアルミニウムを含まないn型の窒化物半導体よりなる第1のn型クラッド層を含み、該p型窒化物半導体層は、アルミニウムを含まないp型の窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも該活性層から離れた位置に設けられ、かつアルミニウムおよびガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含み、さらに該第2のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に形成されたp型Ga_{0.5}Nよりなるp型コンタクト層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0023】ここで、活性層と第1のn型クラッド層とは、合計で300オングストローム以上の厚さを有することが好ましい。また、n型窒化物半導体層は、第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に形成され、かつアルミニウムとガリウムとを含むn型の窒化物半導体よりなる第2のn型クラッド層をさらに含むことができる。さらに、活性層と第1のn型クラッド層と第1のp型クラッド層とは、合計で300オングストローム以上の厚さを有することが好ましい。

【0024】本発明の第10の側面によれば、第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_{0.5}Nよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、該第1のn型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有する第2のn型クラッド層とを含み、さらに、該p型窒化物半導体は、p型Ga_{0.5}Nよりなるp型コンタクト層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0025】ここで、第1のn型クラッド層は、10オングストローム以上、1.0 μm 以下の厚さを有することが好ましい。

【0026】本発明の第11の側面によれば、第1の主面および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半

14

で、 $0 < m < 1$ 、 $0 \leq n < 1$ で示することができる。最も好ましくは、活性層15は、式 $\text{In}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ （ここで、 $0 < m < 1$ ）で示される窒化物半導体を包含する。インジウムの比率、すなわち各式における m の値を変えることにより、紫外から赤色までの領域の発光光を得るようにバンドギャップを変えることができる。なお、以下の記載において、式 $\text{In}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ （ここで、 $0 < m < 1$ ）または同等の式をもって表される窒化物半導体を単に InGaN と表示することがある。

【0034】活性層15は、量子井戸構造のものである。活性層15を量子井戸構造にすることにより、LED素子であれ、LD素子であれ、歪量子井戸効果、エキシトン発光効果等により、高出力の発光素子が実現できる。

【００３５】本発明において、量子井戸構造とは、活性層を構成する窒化ガリウム半導体（ InGaN ）の量子単位間発光を生じさせる構造をいい、単一量子井戸構造および多重量子井戸構造の双方を含む概念である。

【0036】単一量子井戸構造とは、井戸層が単一組成の窒化物半導体の一層からなる構造を指す。すなわち、単一量子井戸構造の活性層は、単一の井戸層だけで構成され、この活性層（すなわち、例えば、単一組成のInGaNからなる）を両側で挟持する2つのクラッド層が隔壁層を構成することとなる。

【0037】また、多重葺き井戸構造とは、井戸層と陸壁層とを順次積層した多層積構造を指す。多重葺き井戸構造の最少積層構造は、1つの陸壁層とこの陸壁層の両側に設けられた(2つの)井戸層とからなる3層構造または1つの井戸層とその両側に設けられた(2つの)陸壁層とからなる3層構造であり得る。多重葺き井戸構造において、両側の2つ最外層は、それぞれ井戸層または陸壁層により構成される。活性層の2つ最外層がそれぞれ井戸層によって構成される多重葺き井戸構造の場合に

は、当該活性層を両側で挟持する2つのクラッド層が障壁層を構成する。この多重量子井戸構造の活性層において、井戸層および障壁層は、両者をインジウムとガリウムを含む窒化物半導体（好ましくは InGaN ）で形成することができる（ただし、両者の組成は異なる）が、井戸層をインジウムとガリウムを含む窒化物半導体（好ましくは、 InGaN ）で形成し、障壁層を他の窒化物半導体で、例えば InN や GaN で形成することもできる。すなわち、この多重量子井戸構造の活性層も、インジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する。

【0038】活性層15は、単一叠子井戸構造の場合では井戸層を100オングストローム以下の厚さに形成し、多重叠子井戸構造の場合では各井戸層を100オングストローム以下の厚さにかつ各隔壁層を150オングストローム以下の厚さに形成することが好ましい。いずれの場合でも、井戸層は70オングストローム以下の厚さを有することがさらに好ましく、50オングストロー

15

μ以下の厚さを有することが最も好ましい。活性層中の障壁層は、100オングストローム以下の厚さに形成することがさらに好ましい。多重量子井戸構造の活性層は、200オングストローム以上の厚さを有することが特に好ましく、通常、0.5 μmまでの厚さを有し得る。

【0039】単一量子井戸構造、多重量子井戸構造いずれの活性層15においても、活性層はn型、p型いずれでもよいが、特にノンドープ（不純物無添加）とすることにより半導体の狭いバンド間発光、励起子発光、あるいは量子井戸準位発光が得られるので、特に好ましい。

【0040】活性層15にドナー不純物および/またはアクセプター不純物をドーピングする場合、当該不純物をドーピングした活性層の結晶性がノンドープの活性層の結晶性と実質的に同じであれば、ドナー不純物をドーピングした活性層は、ノンドープの活性層よりもバンド間発光強度がさらに強くなり得、他方、アクセプター不純物をドーピングした活性層は、本来のバンド間発光のピーク波長よりも約0.5 eV低エネルギー側にシフトした発光ピーク波長を示すが、半導体は広くなる傾向にある。また、アクセプター不純物とドナー不純物の双方をドーピングすると、アクセプター不純物のみドーピングした活性層の発光強度をさらに増大させることができる。特にアクセプター不純物をドーピングした活性層を得ようとする場合、活性層の導電型はS₁等のドナー不純物をもドーピングしてn型とすることが好ましい。

【0041】しかしながら、本発明においては、活性層はバンド間発光により強力に発光するのが理想であるので、活性層15には不純物をドーピングしないことが最も好ましい。また、ノンドープの活性層を有する発光素子よりもV_f（順方向電圧）を低くすることができる。

【0042】活性層15の第1の主面に接して設けられている第1のn型クラッド層14は、インジウムとガリウムとを含むn型の窒化物半導体で形成される。InとGaを含む窒化物半導体は、結晶が比較的柔らかいので、いわばバッファ層として作用し、以下にも述べるように、活性層15およびそれ自体に、あるいはその上に形成され得る他の窒化物半導体層にクラックを生じにくくさせてそれらの結晶性を悪化させず、もって発光素子の発光出力を向上させる。第1のn型クラッド層14は、n型In_jGa_{1-j}N（0<j<1）で形成することが望ましい。このIn_jGa_{1-j}Nにおいて、jの値は、0<j≤0.5の範囲内にあることが好ましい。一般にInGa_{1-j}Nは、Inの比率を多くするに従い、結晶性が次第に悪くなる傾向にあり、n型クラッド層として当該発光素子に実用的に発光出力の高い発光を行わせるためには、j値が0.5以下であることが好ましいのである。j値は、さらに好ましくは0<j≤0.3、最も好ましくは0<j≤0.2の範囲内にある。

(9)

特開2002-141553

16

【0043】また、第1のn型クラッド層14のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。n型クラッド層14中のキャリア濃度が $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ よりも少ないと活性層15への電子注入効率が低下し、発光出力が低下する傾向にあり、他方n型クラッド層14中のキャリア濃度が $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ よりも大きいと第1のn型クラッド層の結晶性が悪くなり、発光出力が低下する傾向にあるからである。

【0044】第1のn型クラッド層14は、その厚さに特に制限はないが、活性層15と第1のn型クラッド層14とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましい。InとGaとを含む窒化物半導体層（活性層+第1のn型クラッド層）の総厚が300オングストロームよりも薄いと、活性層15および第1のn型クラッド層14に、さらには第1のn型クラッド層に接して設けられる別の窒化物半導体層に、格子定数不整合、熱膨張率の差等によりそれらの界面に存在し得る歪応力によって、クラックが生じやすくなるからである。上にも述べたように、InとGaを含む窒化物半導体は、その結晶が比較的柔らかいので、この応力を緩和させるのに有益であるが、その総厚を300オングストローム以上の厚さに形成することにより、当該応力をより一層緩和させるようになる。この総厚は、1 μm以下であることが好ましい。

【0045】活性層15の第2の主面に接して形成されているp型クラッド層16は、p型窒化物半導体で形成される。そのような窒化物半導体は、式In_sAl_tGa_{1-s-t}N（ここで、0≤s、0≤t、s+t≤1）で示すことができる。

【0046】基板11は、サファイア（C面、R面、A面を含む）、SiC（6H-SiC、4H-SiCを含む）、Si₃N₄、ZnO、GaAs、スピネル（MgAl₂O₄、特にその（111）面）、GaN、窒化物半導体と格子定数の近い窒化物単結晶等で形成することができるが、一般的には、サファイア、スピネル、GaNまたはSiCが使用される。

【0047】基板11上に形成されているバッファ層12は、基板11とその上に形成される窒化物半導体層との格子不整合を緩和するために通常形成されるものであり、例えばGaN、AlN、GaAlN等により数百オングストロームの厚さに形成される。なお、基板11がその上に形成される窒化物半導体と格子定数が近いSiCやZnOのような材料で形成されている場合、また基板11がその上に形成される窒化物半導体と格子整合している場合には、このバッファ層12は形成されないこともある。

【0048】バッファ層12上には、第1のn型クラッド層14にも接してn型コンタクト層13が形成されている。このn型コンタクト層13は、GaN、AlGa

(10)

特開2002-141553

17

N等で形成することが好ましい。

【0049】基板11に所定の各半導体層を形成した後、エッチングにより露出されたn型コンタクト層の表面上には、負電極18が形成されている。

【0050】n型コンタクト層13は、Ga_{1-a}Nで形成すると、負電極18とのより一層好ましいオーミックコンタクトが達成され、発光素子の順方向電圧(V_f)をより一層低下させる。また、Ga_{1-a}Nはその結晶性が他の三元混晶、四元混晶の窒化物半導体に比べて優れているため、その上に成長させる第1のn型クラッド層14等の窒化物半導体層の結晶性を向上させることができるので、発光素子の発光出力を向上させる。

【0051】また、n型コンタクト層13のキャリア濃度は、負電極18との好ましいオーミック接触の達成およびその結果としてのV_fの低下並びに発光出力の低下防止の観点から、 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。

【0052】負電極18は、n型コンタクト層13との好ましいオーミックコンタクトの達成の観点から、チタン(Ti)と金(Au)とを含む金属材料、例えばそれらの積層構造または合金、またはTiとアルミニウム(Al)とを含む金属材料、例えばそれらの積層構造または合金で形成することが最も好ましい。この場合において、負電極18は、n型Ga_{1-a}Nコンタクト層13に直接接して設けられたチタン層とその上に形成されたアルミニウム層との2層構造として形成することが特に好ましい。

【0053】p型クラッド層16上には、p型コンタクト層17が形成され、その上には、正電極19が形成されている。p型コンタクト層17は、Ga_{1-a}N、Al_{1-a}GaN等で形成することが好ましい。特にp型コンタクト層17をGa_{1-a}Nで形成すると、正電極19とのより一層好ましいオーミックコンタクトが達成され、発光素子のV_fを低下させることができる。

【0054】正電極19との好ましいオーミック接触の達成およびその結果としてのV_fの低下並びに発光出力の低下防止の観点から、p型コンタクト層17のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。

【0055】正電極19は、p型コンタクト層17との好ましいオーミックコンタクトの達成の観点から、ニッケル(Ni)と金(Au)とを含む金属材料、例えばそれらの積層構造または合金で形成することが最も好ましい。この場合において、正電極19は、p型Ga_{1-a}Nコンタクト層17に直接接して設けられたニッケル層とその上に形成された金層との2層構造として形成することが特に好ましい。

【0056】図2は、本発明の窒化物半導体発光素子の別の態様を示す。

【0057】図2に示す発光素子20は、第1のn型ク

18

ラッド層14とn型コンタクト層13との間に、第2のn型クラッド層21を設けた以外は、図1に示す窒化物半導体素子と同様の構造を有する。

【0058】この発光素子20において、図1に示す発光素子構造に付加して設けられている第2のn型クラッド層21は、アルミニウムとガリウムを含むn型窒化物半導体で形成されている。このような第2のn型クラッド層21を設けることによって、第1のn型クラッド層14との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0059】この第2のn型クラッド層21は、好ましくは、n型Al_aGa_{1-a}N(ここで、 $0 < a \leq 1$)で形成される。この場合において、aの値は、 $0 < a \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。Al_aGa_{1-a}Nはその結晶が比較的硬く、 0.6 より大きいと、第1のn型クラッド層14の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。aの値は、 $0 < a \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。なお、本明細書において、Al_aGa_{1-a}Nまたは同等の式をもって表される窒化物半導体を単にAl_aGa_{1-a}Nと表示することがある。

【0060】また、第2のn型クラッド層21のキャリア濃度は、 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、Al_aGa_{1-a}Nの抵抗率が高くなるので、発光素子のV_fが高くなり、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いとAl_aGa_{1-a}Nの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。第2のn型クラッド層21は、通常、50オングストローム $\sim 0.5 \mu\text{m}$ の厚さをもって形成することができる。

【0061】基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、n型クラッド層14、活性層15、p型クラッド層16、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に関して説明した通りのものである。

【0062】図3は、本発明による窒化物半導体発光素子の他の構造を示す概略断面図である。

【0063】図3に示す窒化物半導体発光素子30は、活性層15、並びに活性層15を両側で挟んでいるn型クラッド層34および第1のp型クラッド層36からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、図1に示す構造と同様、バッファ層12およびn型コンタクト層13を介して、基板11上に設けられている。

【0064】活性層15の第2の主面に接して設けられている第1のp型クラッド層36は、インジウムとガリウムとを含むp型の窒化物半導体で形成される。InとGaを含む窒化物半導体は、結晶が比較的柔らかいので、いわばバッファ層として作用し、以下にも述べるように活性層15およびそれ自体に、あるいはその上に形

19

成され得る他の窒化物半導体層にクラックを生じにくくさせてそれらの結晶性を悪化させず、もって発光素子の発光出力を向上させる。第1のp型クラッド層36は、p型In, Ga, N ($0 < k < 1$)で形成することが望ましい。このIn, Ga, Nにおいて、kの値は、 $0 < k \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましい。一般にInGa_{1-k}Nは、Inの比率を多くするに従い、結晶性が次第に悪くなる傾向にあり、p型クラッド層として当該発光素子に実用的に発光出力の高い発光を行わせるためには、k値が0.5以下であることが好ましいのである。k値は、さらに好ましくは $0 < k \leq 0.3$ 、最も好ましくは $0 < k \leq 0.2$ の範囲内にある。

【0065】また、第1のp型クラッド層36のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。第1のp型クラッド層36中のキャリア濃度が $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも少ないと活性層15への電子注入効率が低下し、発光出力が低下する傾向にあり、他方p型クラッド層36中のキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも大きいと第1のp型クラッド層の結晶性が悪くなり、発光出力が低下する傾向にあるからである。第1のp型クラッド層36は、図1に示す構造におけるp型クラッド層16に関して述べた方法により好ましく得られる。

【0066】第1のp型クラッド層36は、その厚さに特に制限はないが、活性層15と第1のp型クラッド層36とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましい。InとGaを含む窒化物半導体層（活性層+第1のp型クラッド層）の総厚が300オングストロームよりも薄いと、活性層15および第1のp型クラッド層36に、さらには第1のp型クラッド層に接して設けられる別の窒化物半導体層に、格子定数不整、熱膨張率の差等によりそれらの界面に存在し得る歪応力によって、クラックが生じやすくなるからである。上にも述べたように、InとGaを含む窒化物半導体は、その結晶性が比較的柔らかいので、この応力を緩和させるのに有益であるが、その総厚を300オングストローム以上の厚さに形成することにより、当該応力をより一層緩和させるようになる。この総厚は、1μm以下であることが好ましい。

【0067】活性層15の第1の主面に接して形成されているn型クラッド層34は、n型窒化物半導体で形成される。そのような窒化物半導体は、式In_uAl_vGa_{1-u-v}N ($0 \leq u, 0 \leq v, u+v \leq 1$)で示すことができる。

【0068】基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、活性層15、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に関して説明した通りのものである。

【0069】図4は、本発明による窒化物半導体発光素子の別の態様を示す。

(11)

特開2002-141553

20

【0070】図4に示す発光素子40は、第1のp型クラッド層36とp型コンタクト層17との間に、第2のp型クラッド層41を設けた以外は、図3に示す窒化物半導体素子と同様の構造を有する。

【0071】この発光素子40において、図3に示す発光素子構造に付加して設けられている第2のp型クラッド層41は、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成されている。このような第2のp型クラッド層41を設けることによって、第1のp型クラッド層36との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0072】この第2のp型クラッド層41は、好ましくは、p型Al, Ga, N (ここで、 $0 < b < 1$)で形成される。この場合において、bの値は、 $0 < b \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。AlGa_{1-b}Nはその結晶性が比較的硬く、0.6より大きいと、第1のp型クラッド層36の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。b値は、 $0 < b \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。

【0073】また、第2のp型クラッド層41のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、活性層15への正孔の注入効率が低下し、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いとAlGa_{1-b}Nの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。第2のp型クラッド層41は、通常、50オングストローム～0.5μmの厚さをもって形成することができる。

【0074】基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、活性層15、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に関して説明した通りのものであり、n型クラッド層34および第1のp型クラッド層36は、図3に関して説明した通りのものである。

【0075】図5は、本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図である。

【0076】図5に示す窒化物半導体発光素子50は、活性層15、並びに活性層15をその両側で挟む第1のn型クラッド層54を含むn型半導体層501および第2のp型クラッド層41を含むp型半導体層502からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、図1に示す構造と同様、バッファ層12およびn型コンタクト層13を介して、基板11上に設けられている。図5では、n型半導体層501は、第1のn型クラッド層54により構成されている。

【0077】この発光素子50は、図1に示す発光素子10におけるn型クラッド層構造と図4に示すp型クラッド層構造を組み合わせた半導体積層構造を有するもの

50

(12)

特開2002-141553

21

といえるが、この特別の場合においては、第1のn型クラッド層54は、図1に示す第1のn型クラッド層14を構成するインジウムとガリウムを含む窒化物半導体ばかりでなく、Ga_{1-x}N_xによってこれを形成でき、同様の効果を奏することがわかった。また、この場合には、第1のp型クラッド層56は、図1に示す発光素子10におけるp型クラッド層16と同様、いずれのp型窒化物半導体で形成してもよいこともわかった。このような半導体積層構造によっても、発光素子は同様の優れた特性を示す。

【0078】より詳しく説明すると、第1のn型クラッド層54は、アルミニウムを含まないn型窒化物半導体により形成される。この第1のn型クラッド層54は、n型In_xGa_{1-x}N（ここで、0 ≤ w < 1）で形成することが好ましい。すなわち、この第1のn型クラッド層54は、図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明したn型窒化物半導体で形成することもできるし、n型Ga_{1-x}Nで形成することもできる。図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明した理由と同様の理由から、wの値は、0 ≤ w ≤ 0.5の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは0 < w ≤ 0.3、最も好ましくは0 < w ≤ 0.2の範囲内にある。第1のn型クラッド層54のキャリア濃度も、同様の理由から、1 × 10¹⁸/cm³ ~ 1 × 10¹⁹/cm³の範囲内にあることが望ましい。第1のn型クラッド層54も、その厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層15と第1のn型クラッド層54とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましく、1 μm以下の厚さを有し得る。

【0079】図5に示す発光素子50において、活性層の第2の主面に残して形成されている第1のp型クラッド層56は、いずれのp型窒化物半導体で形成してもよいが、アルミニウムを含まないp型窒化物半導体で形成することが好ましい。より具体的には、第1のp型クラッド層56は、p型In_xGa_{1-x}N（ここで、0 ≤ x < 1）で形成することが望ましい。図3の発光素子30における第1のp型クラッド層36に関して説明した理由と同様の理由から、x値は、0 ≤ x ≤ 0.5の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは0 ≤ x ≤ 0.3の範囲内、最も好ましくは0 ≤ x ≤ 0.2の範囲内にある。この第1のp型クラッド層56も同様にGa_{1-x}Nにより形成してもいわずバフファ層として同様に作用する。また、この第1のp型クラッド層56のキャリア濃度も、同様の理由から、1 × 10¹⁷/cm³ ~ 1 × 10¹⁸/cm³の範囲内にあることが望ましい。さらに、第1のクラッド層56の厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層15との合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましく、1 μm以下の厚さが好ましい。なお、この第1のp型クラッド層56

22

は省略してもよいが、これを形成すれば、第1のp型クラッド層がバフファ層として作用するのでクラックが生じにくくなり、その発光素子は、より一層優れた特性を示すことは明らかであろう。

【0080】第2のp型クラッド層41は、図4に示す発光素子40における第2のクラッド層41について説明した通りのものである。

【0081】また、基板11、バフファ層12、n型コンタクト層13、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に示す発光素子10に関して説明した通りのものである。

【0082】図6は、本発明による半導体発光素子のさらに別の形態の構造を示す概略断面図である。この発光素子60は、n型コンタクト層13と第1のn型クラッド層54との間に、第2のn型クラッド層21が追加形成されている以外は、図5に示す発光素子50と同様の構造を有する。この第2のn型クラッド層21は、図2に示す発光素子20における第2のn型クラッド層21について説明した通りのものである。なお、第1のp型クラッド層56は、省略するよりも、これを設けた方が好ましいことも、図5に示す発光素子50の場合と同様である。

【0083】以上、本発明による窒化物半導体発光素子についていくつか説明したが、これら発光素子の構造は、LED素子にも、LD素子にも適用できることはいうまでもない。LDの構造は、例えば図7に斜視図として示す構造をとる。図7において、基板11上の半導体層71は、上記バフファ層12、n型コンタクト層13、第1のn型クラッド層および形成された場合の第2のn型層からなる半導体層である。活性層15上に形成されている半導体層72は、上記形成された場合の第1のクラッド層および第2のクラッド層並びにp型コンタクト層17層からなる半導体層である。印加された電流は、活性層15において、正電極19に対応する領域15aに集中して流れる。

【0084】なお、LD素子の場合には、上記発光素子10ないし60のいずれかの第1のn型クラッド層とn型コンタクト層13との間、第2のn型クラッド層が形成されている場合には、その第2のn型クラッド層とn型コンタクト層13との間に、および/または上記発光素子10ないし60のいずれかの第1のp型クラッド層とp型コンタクト層17との間、第2のp型クラッド層が形成されている場合には、その第2のp型クラッド層とn型コンタクト層13との間に、互いに組成の異なる少なくとも2種類の窒化物半導体層を積層してなる多層膜を光反射膜として形成することもできる。

【0085】図6に示す発光素子構造に上記多層光反射膜を適用した例を図8に示す。図8に示す窒化物半導体発光素子80は、n型コンタクト層13と第2のn型クラッド層21との間に第1の多層光反射膜（n型）81

(13)

特開2002-141553

23

24

を、また第2のp型クラッド層41とp型コンタクト層17との間に第2の多層光反射膜(p型)82を備える。

【0086】第1の多層膜81および第2の多層膜82は、いずれも、互いに組成の異なる窒化物半導体、すなわち互いに屈折率の異なる窒化物半導体を、各層を例えば $\lambda/4n$ （ここで、 λ は活性層15からの発光光の波長、 n は屈折率）で算出される厚さで交互に2層以上積層して形成されるものであり、活性層15からの発光光をそれら膜により反射できるように設計されている。正電極19を図7に示すような形状のストライプ電極として例えば幅10 μm 以下に形成し、レーザ発振を行わせると、活性層15の発光光を多層膜反射層により活性層15内に閉じこめることがより一層容易となり得るので、容易にレーザ発振できる。また、LEDモードにおいても、多層膜反射層により発光光の漏れが抑えられ、外部量子効率が向上する。

【0087】多層光反射膜81および82には、それぞれ、ドナー不純物およびアクセプター不純物がドーパされて所定の導電型となっている。

【0088】なお、図8に示す構造においては、第1の多層光反射膜81は、n型コンタクト層13と第2のn型クラッド層21との間に形成されているが、その代りに、これをn型コンタクト層13内に形成することもできる。同様に、第2の多層光反射膜82をp型コンタクト層17内に形成してもよい。多層光反射膜は、コンタクト層内に形成しても、活性層16からの発光光を同様に閉じ込めることができる。また、第1の多層光反射膜81および第2の多層光反射膜82のいずれかを省略してもよい。

【0089】また、図8に示すように、サファイアのような絶縁性材料を基板11としてレーザ素子を作製する場合、レーザ素子の構造はフリップチップ方式となる。すなわち、基板11の同一面側に、より具体的には、基板11の窒化物半導体層形成側に正、負両電極19、18を形成する構造となる。この場合、図8に示すように、n型層側に形成する第1の多層光反射膜81は、負電極18が形成されているn型コンタクト層13の水平面よりもp型側すなわち上方に位置して形成することが好ましい。第1の多層光反射膜81をn型コンタクト層13の水平面よりも基板11側に形成すると、第2のn型クラッド層21とn型コンタクト層13との屈折率の差が小さいために、活性層15からの発光光が、活性層15よりも下側に位置するn型コンタクト層13中に広がってしまい、十分な光閉じこめができない場合があるからである。これは、サファイアのような絶縁性基板を使用した窒化物半導体レーザに特有の現象である。

【0090】さて、各多層光反射膜81、82を構成する2種類の窒化物半導体は、少なくとも一方がインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体（例えばIn、Ga

、N（ここで、 $0 < q < 1$ ））またはGa Nであることが好ましい。なぜなら単一層を積層して多層光反射膜とする場合、その単一層の一方をIn Ga NまたはGa Nで形成することにより、そのIn Ga NまたはGa N層がバッファ層のような作用をして、もう一方の単一層にクラックが入るのを防止することができるからである。これは、In Ga N層、Ga N層の結晶がAl Ga Nに比べて柔らかいことによるものである。これに対し、多層光反射膜を例えば互いにAl組成の異なるAl Ga N層により、例えば総膜厚0.5 μm 以上となるように多層形成すると、多層膜中にクラックが入り、素子作製が困難となる。

【0091】各多層光反射膜を構成する2種類の窒化物半導体層の最良の組み合わせは、一方を前記のようにIn、Ga、NまたはGa Nで形成し、もう一方をアルミニウムおよび/またはガリウムを含む窒化物半導体（例えば、Al、Ga、N（ここで、 $0 \leq c < 1$ ））で形成するものがある。In、Ga、NとAl、Ga、Nとは屈折率の差が大きいため、これらの材料で多層光反射膜を構成することにより、発光波長に応じて反射率の大きい多層光反射膜の設計が可能となる。また、In、Ga、Nがバッファ層として作用し得るため、Al、Ga、N層にクラックが入ることなく10層以上積層することができる。なお、In N、Ga N、およびAl Nの屈折率は、それぞれ、2.9、2.5、および2.15である。これらの複素屈折率はベガードの法則に従うと仮定し、組成に比例するものとして求めることができる。

【0092】図9は、本発明による窒化物半導体発光素子のさらに他の形態の構造を示す概略断面図であって、LD素子としての構造を示す。

【0093】図9に示す窒化物半導体発光素子90は、活性層95、並びに活性層95を両側で挟んでいるn型窒化物半導体層94およびp型窒化物半導体層96からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層92およびn型コンタクト層93を介して、基板91上に設けられている。

【0094】活性層95は、図1に示す半導体発光素子10における活性層15と同様、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造（単一量子井戸構造または多重量子井戸構造）のものであり、活性層15についての上記説明は、この活性層95にもそのまま適用される。

【0095】p型窒化物半導体層96は、活性層95の第2の主面に直接接して形成された第1のp型クラッド層96aおよびこの第1のp型クラッド層96a上に形成された第2のp型クラッド層96bを含む。

【0096】第1のp型クラッド層96aは、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成されている。第1のp型クラッド層96aをアルミニウムとガリ

(14)

特開2002-141553

25

ウムを含む窒化物半導体で形成すると、量子井戸構造故に不十分であり得る活性層95中の光閉じ込めがより完全なものとなり、このように第1のp型クラッド層95は活性層95中に光を閉じ込めるための良好な光ガイド層として作用することが見い出された。

【0097】第1のp型クラッド層96aは、p型Al_{1-x}Ga_xN（ここで、0<d<1）で形成することが最も好ましい。Al_{1-x}GaNは高キャリア濃度のp型のものが得られやすく、しかもInGa_{1-x}Nを包含する活性層95に対し、バンドギャップ差および屈折率差を、他の窒化物半導体に比べて、大きくできるからである。その上、p型Al_{1-x}GaNは、他の窒化物半導体に比べて、成長時に分解しにくいという性質を有しており、例えば有機金属気相エピタキシャル成長法（MOVPE法）によりこれを成長させる際、下側の活性層95のInGa_{1-x}Nの分解を抑制し、その結果として結晶性に優れた活性層95を提供し、もって発光素子の出力を向上させることとなる。

【0098】第1のp型クラッド層96aは、100Å以上、1.0μm以下の厚さを有することが好ましい。その厚さが100Åより薄いと、第1のp型クラッド層を設けた効果が得られず、他方その厚さが1.0μmより厚いと、第1のp型クラッド層自体にクラックが入りやすくなるため、素子作成が難しくなる傾向にある。第1のp型クラッド層96aは、100Å以上0.5μm以下の厚さを有することがさらに好ましい。

【0099】第1のp型クラッド層96aは、LED素子の場合を含めて一般的には上記範囲内の厚さを有することが好ましいが、特にLED素子の場合には、100Å以上（同様の理由から、1.0μm以下）の厚さを有することがさらに好ましい。その厚さが100Åより薄いと、第1のp型クラッド層が光ガイド層として作用しにくくなるのである。この場合において、第1のp型クラッド層96aは、100Å以上0.5μm以下の厚さを有することが最も好ましい。

【0100】第1のp型クラッド層96a上に設けられる第2のp型クラッド層96bは、第1のp型クラッド層96aよりもバンドギャップが大きく、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成される。このようなp型窒化物半導体により第2のp型クラッド層96bを形成することにより、当該第2のクラッド層が光閉じ込め層として効果的に作用し、有効なLED素子等を提供できることがわかった。

【0101】第2のp型クラッド層96bも、第1のp型クラッド層96aの場合と同様に、高キャリア濃度のp型のものが得られやすいことから、三元混晶のp型Al_{1-x}Ga_yIn_{1-x-y}N（ここで、0<e<1）で形成することが最も好ましい。加えて、第2のp型クラッド層96b

26

は、これをp型Al_{1-x}GaNで形成すると、第1のp型クラッド層とのバンドギャップの差および屈折率の差を大きくすることができるので、光閉じ込め層としてより一層効果的に作用するようになる。なお、第2のp型クラッド層96bは、第1のp型クラッド層96aよりもバンドギャップが大きいので、例えば、前者を構成するAl_{1-x}Ga_yIn_{1-x-y}Nにおけるfの値は、後者を構成するAl_{1-x}Ga_yIn_{1-x-y}Nにおけるeの値よりも大きい値をとる。この場合でも、できれば、これら式におけるd値およびe値は、0を超え0.6までであることが望ましく、0を超え0.4までであることがさらに望ましい。

【0102】第2のp型クラッド層96bは、その厚さに特に制限はないが、500Åより厚くない1μm程度の厚さを有することが好ましい。第2のp型クラッド層をこのような厚さに形成することにより、それ自体におけるクラックの発生がより少なく、従って結晶性がより良好で、しかも高キャリア濃度のp型Al_{1-x}GaN層が得られるのである。

【0103】なお、第1のp型クラッド層96aおよび第2のp型クラッド層96bは、いずれも、1×10¹⁷～1×10¹⁹/cm³という高キャリア濃度を有するものとして提供することができる。

【0104】また、第1のp型クラッド層96aと第2のp型クラッド層96b層との間に、p型InGa_{1-x}Nまたはp型Ga_{1-x}Nよりなる層を100Å以上1μmまでの厚さに形成してもよい。この層は、光ガイド層およびバッファ層として作用する。

【0105】活性層95の第1の主面に接して設けられているn型クラッド層94は、いずれものn型窒化物半導体で形成することができる。しかしながら、n型クラッド層94は、結晶性がより一層優れた層として形成され得ることから、Ga_{1-x}Al_xN、InGa_{1-x}N等の二元混晶、三元混晶の窒化物半導体で形成することが好ましい。特にInGa_{1-x}NまたはGa_{1-x}Nによりn型クラッド層94を形成することにより、その上により一層良好な活性層95を設けることができ、発光素子の出力が格段に向上する。

【0106】n型クラッド層94は、LED素子の場合には、100Å以上、1μm以下の膜厚で形成することが望ましい。

【0107】基板91は、図1に示す発光素子10における基板11と同様のものであり、基板11についての上記説明がこの基板91についてもそのまま適用できる。

【0108】基板92上に形成されているバッファ層92も、図1に示す発光素子10におけるバッファ層12と同様のものであり、バッファ層12についての上記説明がこのバッファ層92についてもそのまま適用できる。特別の場合には、このバッファ層92を省略することもできることも同様である。

(15)

特開2002-141553

27

【0109】バッファ層92上に設けられているn型コンタクト層93も、図1に示す発光素子10におけるn型コンタクト層13と同様のものであり、n型コンタクト層13についての上記説明がこのn型コンタクト層93についてもそのまま適用できる。

【0110】第2のp型クラッド層96b上に設けられているp型コンタクト層97も、図1に示す発光素子におけるp型コンタクト層17と同様のものであり、p型コンタクト層17についての上記説明がこのp型コンタクト層97についてもそのまま適用できる。

【0111】n型コンタクト層93の露出表面に形成されている負電極98も、図1に示す発光素子における負電極18と同様のものであり、負電極18についての上記説明がこの負電極98についてもそのまま適用できる。

【0112】p型コンタクト層97に接続して設けられている正電極99も、図1に示す発光素子における正電極19と同様のものであり、正電極19についての上記説明がこの正電極99についてもそのまま適用できる。ただし、図9に示すLED構造において、p型コンタクト層97上には、透孔100aを有し、二酸化ケイ素等の絶縁材料で形成された電流狭窄層100が設けられており、正電極99は、この電流狭窄層100の透孔100aを通してp型コンタクト層97と接している。

【0113】さて、本発明について、図9に関し、主としてLED素子について説明したが、LED素子の場合には、電流狭窄層100を設ける必要はない。また、LED素子の場合には、第2のp型クラッド層96bを省略することもできる。さらに、LED素子の場合には、n型クラッド層94の好ましい厚さは100オングストローム以上、1.0 μ m以下、さらに好ましくは30オングストロームないし1.0 μ mとなり、あるいはこのn型クラッド層94自体を省略することもできる。n型クラッド層94を省略した場合、n型コンタクト層93がクラッド層として作用し得る。LED素子の場合、図9に示す構造において、n型クラッド層94を省略し、かつ第2のp型クラッド層96bを省略し、当然電流狭窄層100をも省略し、n型コンタクト層をn型GaNで形成し、p型コンタクト層97をp型GaNで形成した構造、すなわち、インジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層を有し、その第1の主面上にn型GaN層が形成され、活性層の第2の主面上にアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体層が形成され、このp型窒化物半導体上にp型GaN層が形成された構造を有するものが最も好ましいLED素子構造である。これは、本発明の1つの側面による窒化物半導体発光素子に相当する。

【0114】図10は、本発明による窒化物半導体発光素子の他の形態の構造を示す概略断面図であって、図9と同様、LED素子としての構造を示す。

28

【0115】図10に示す窒化物半導体発光素子200は、活性層95、並びに活性層95を両側で挟んでいるn型窒化物半導体層294およびp型窒化物半導体層296からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層92およびn型コンタクト層93を介して、基板91上に設けられている。

【0116】n型窒化物半導体層294は、活性層95の第1の主面に直接接して形成された第1のn型クラッド層294aおよびこの第1のn型クラッド層294a上に形成された第2のn型クラッド層294bを含む。

【0117】第1のn型クラッド層294aは、n型GaNまたはインジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体で形成されている。第1のn型クラッド層294aをGaNまたはインジウムとガリウムを含む窒化物半導体で形成すると、量子井戸構造故に不十分であり得る活性層95中の光閉じ込めがより完全なものとなり、このように第1のn型クラッド層294aは、活性層95中に光を閉じ込めるための良好な光ガイド層として作用する（LED素子の場合）ばかりでなく、当該第1のn型クラッド層がいわばバッファ層として作用してその上に形成される活性層95にクラックの発生を少なくさせ、発光素子の発光出力を増大させることができることが見出された。

【0118】第1のn型クラッド層294aは、In, Ga, N（ここで、 $0 < r < 1$ ）で形成することが最も好ましい。この場合において、rの値は、上記理由と同様の理由から、好ましくは0.5まで、より好ましくは0.3まで、さらに好ましくは0.2までの値をとる。また、そのキャリア濃度も、上記理由と同様の理由から、 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ であることが好ましい。

【0119】第1のn型クラッド層294aは、100オングストローム以上の厚さを有することが好ましい。第1のn型クラッド層294aは、100オングストローム以上の厚さに形成することにより、活性層95と以後述べる第2のn型クラッド層294bとの間のバッファ層としてより一層効果的に作用する。すなわち、第1のn型クラッド層294aを構成するInGaNまたはGaNは、その結晶が比較的柔らかいので、第2のn型クラッド層294bと活性層23との間の格子定数不整合と熱膨張係数差によって生じる歪をより一層効果的に吸収することができ、バッファ層としてより一層有効に作用することとなる。その結果、活性層95が十分に薄いものであっても、この第1のn型クラッド層294aの存在により、活性層95、第2のn型クラッド層294b、ひいてはp型クラッド層296にクラックが入りにくくなり、それらの結晶性が良好なものとなるので、発光素子の発光出力をより一層増大させる。

【0120】第1のn型クラッド層294aは、LED素子の場合には、上記範囲内の厚さを有することが好ま

(15)

特開2002-141553

29

しいが、特にLED素子の場合には、1000オングストローム以上厚さを有することが特に好ましい。その厚さが1000オングストローム未満であると、光ガイド層として作用しにくくなるのである。

【0121】また、第1のn型クラッド層294aは、いずれの場合でも、1.0μm以下の厚さを有することが好ましい。その厚さが1.0μmよりも厚いと、その結晶の色が黒味を帯びるとともに、多数のビットが結晶中に生成する傾向にあり、そのため、高出力のLED、LED素子を得ることが困難となり得る。

【0122】第1のn型クラッド層294aに接して設けられている第2のn型クラッド層294bは、バンドギャップが第1のn型クラッド層294aよりも大きければいずれの窒化物半導体で形成してもよく、例えば、GaN、AlGaN等の二元混晶、三元混晶の窒化物半導体で形成することができる。このようなn型窒化物半導体により第2のn型クラッド層294bを形成することにより、当該第2のn型クラッド層294bが光閉じ込め層として効果的に作用し、有効なLED素子等を提供できることがわかった。

【0123】第2のn型クラッド層294bは、n型Al_{1-f}Ga_fN（ここで、0<f<1）で形成することが最も好ましい。n型AlGaNは、InGaNを包含する活性層95に対し、バンドギャップ差および屈折率差を、他の窒化物半導体に比べて、大きくできるからである。この場合において、fの値は、上記理由と同様の理由から、0.6までの値をとることが好ましく、0.4までの値をとることがさらに好ましい。そのキャリア濃度も、上記理由と同様の理由から、 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ であることが好ましい。また第2のn型クラッド層294bとn型コンタクト層93との間に、n型InGaNよりなる層を設けることにより、AlGaNよりなる第2のn型クラッド層を良好な結晶性をもってクラックの発生を少なくして成長させることができる。

【0124】第2のn型クラッド層294bは、その厚さに特に制限はないが、500オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することが好ましい。第2のn型クラッド層294bをこの範囲内の厚さに形成することによって、クラックがない結晶性の優れた第2のn型クラッド層294bが得られるのである。

【0125】活性層95の第2の主面に接して設けられているp型半導体層（クラッド層）296は、いずれもp型窒化物半導体で形成することができる。しかしながら、p型クラッド層296は、結晶性がより一層優れた層として形成され得ることから、p型AlGaNで形成することが好ましい。p型AlGaNは、他の窒化物半導体に比べて、成長時に分解しにくいという性質を有しており、例えば有機金属気相エピタキシャル成長法（MOVPE法）によりこれを成長させる際、下側の活

30

性層95のInGaNの分解を抑制し、その結果として結晶性に優れた活性層95を提供し、もって発光素子の出力を向上させることとなる。この場合において、アルミニウムの比率やキャリア濃度については、図9に示す発光素子90における第1のp型クラッド層96aおよび第2のp型クラッド層96bについて好ましいとした値をとることが同様に好ましい。

【0126】p型クラッド層296は、LED素子の場合には、1000オングストローム以上、1μm以下の膜厚で形成することが望ましい。

【0127】活性層95、基板91、基板91上に形成されているバッファ層92、バッファ層92上に設けられているn型コンタクト層93、さらにはp型コンタクト層97、負電極98、正電極99および電流拡散層100は、図9に示す発光素子に関して説明した通りのものである。

【0128】さて、本発明について、図10に関し、主としてLED素子について説明したが、LED素子の場合には、電流拡散層100を設ける必要はない。また、LED素子の場合には、第2のn型クラッド層294bを省略することもできる。その場合、n型コンタクト層93が第2のn型クラッド層として作用する。

【0129】図11は、本発明による窒化物半導体発光素子のさらに別の形態の構造を示す概略断面図であって、図9および図10と同様、LED素子としての構造を示す。

【0130】図11に示す窒化物半導体発光素子300は、活性層95、並びに活性層95を両側で挟んでいるn型窒化物半導体層294およびp型窒化物半導体層96からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層92およびn型コンタクト層93を介して、基板91上に設けられている。

【0131】図11に示す発光素子300は、n型窒化物半導体層については図10に示す発光素子200におけるn型窒化物半導体層294（第1のn型クラッド層294aおよび第2のn型クラッド層294bからなる）を、p型窒化物半導体層については図9に示す発光素子90におけるp型窒化物半導体層96（第1のp型クラッド層96aおよび第2のp型クラッド層96bからなる）を適用したものであり、本発明の最も好ましい実施形態の一つである。各半導体層その他の構成については、特にLED素子の場合に省略し得る窒化物半導体層および特にLED素子の場合の窒化物半導体層の厚さについての上記説明を含めて、図9および図10に関して説明したことがそのまま適用でき、他言を要しない。従って、図11に示す発光素子において、n型コンタクト層93をn型GaNで、第2のn型クラッド層294bをn型AlGaNで、第1のn型クラッド層294aをn型InGaNまたはn型GaNで、第1のp型クラッド層96aをp型AlGaNで、第2のp型クラ

(17)

特開2002-141553

31

32

ッド層96bをp型AlGaInで、p型コンタクト層97をp型GaInでそれぞれ形成し、活性層95をノンドープとすることが最も好ましい。なお、図11に示すLD素子構造の場合には、いうまでもなく、第1のn型クラッド層294aが光ガイド層、第2のクラッド層294bが光閉じ込め層、第1のp型クラッド層96aが光ガイド層、第2のp型クラッド層96bが光閉じ込め層として作用することも明らかである。また第1のp型クラッド層96aと第2のp型クラッド層96bとの間に、p型InGaInまたはp型GaInよりなる層をバッファ層として形成してもよいし、n型コンタクト層93と第2のn型クラッド層294bとの間に、n型InGaInよりなる層をバッファ層として形成してもよい。

【0132】本発明の1つの側面によれば、n型窒化物半導体層とp型窒化物半導体層との間にインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層を有し、p型窒化物半導体層は、活性層と接して形成されかつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層を含み、第1のp型クラッド層は、100Å以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0133】この側面による発光素子は、基本的には、図9に示す発光素子90の構造から第2のp型クラッド層96bを省略した特別の場合に該当する。この特別の場合には、さらに、図9に示す発光素子の構造からn型コンタクト層93およびn型クラッド層94のうちのいずれかを省略してもよく（n型クラッド層を94を省略した場合、n型コンタクト層93がn型クラッド層として作用する）、またp型コンタクト層97をも省略してもよい。

【0134】さらにまた、この特別の場合には、図9に示す発光素子90における第2のp型クラッド層96bに相当する第2のp型クラッド層をp型GaInまたはインジウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体（好ましくは、InGaIn）で形成することができ、これについては、図1に示す発光素子10におけるn型クラッド層14についての説明が適用できる。さらにまた、図9に示す発光素子90におけるn型クラッド層94に相当するn型クラッド層（第1のn型半導体層）に接して、すなわち第1のn型クラッド層94とn型コンタクト層93との間に、n型GaInまたはアルミニウムとガリウムとを含む第2のn型窒化物半導体（好ましくは、AlGaIn）を設けることも好ましい。この場合については、n型GaIn層を含めて、図2に示す発光素子20における第2のn型クラッド層21についての説明が適用できる。

【0135】図12は、本発明による窒化物半導体発光素子のさらに別の形態の構造を示す概略断面図であって、LD素子として特に好ましい構造の一つを示してい

る。図12の窒化物半導体発光素子は、以下述べる第1のp型クラッド層を除くと、図6に関して説明した本発明の好ましい形態にほぼ相当することができる。

【0136】図12に示す窒化物半導体発光素子400は、活性層405を備え、その第1の主面上には、第1のn型クラッド層414、第2のn型クラッド層424およびn型コンタクト層403を含むn型半導体層が設けられている。加えて、活性層405の第2の主面には、第1のp型クラッド層416、第2のp型クラッド層426、第3のp型クラッド層436、および最外層としてのp型コンタクト層407を含むp型窒化物半導体層を有する。このような積層構造は、図12に示す構造では、バッファ層402を介して、基板401上に設けられている。

【0137】活性層405は、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含するものであり、当該インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体の量子並列間発光を生じさせる構造、言い換えると量子井戸構造を構成する。このような構造については、図1に示す発光素子10の活性層15に関して説明したことがすべてそのまま適用される。LD素子の場合には、活性層405は多量量子井戸構造をとることが最も好ましい。

【0138】活性層405の第1の主面に接して設けられている第1のn型クラッド層414は光ガイド層として作用するものであり、インジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体またはn型GaInで形成されている。より具体的には、この第1のn型クラッド層414は、n型InGaIn、N（ここで、 $0 \leq y < 1$ ）で形成される。すなわち、この第1のn型クラッド層414は、図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明したn型InGaInで形成することもできるし、n型GaInで形成することもできる。図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明した理由と同様の理由から、yの値は、 $0 \leq y \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは $0 < y \leq 0.3$ 、最も好ましくは $0 < y \leq 0.2$ の範囲内にある。第1のn型クラッド層414のキャリア濃度も、同様の理由から、 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。第1のn型クラッド層414も、その厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層15と第1のn型クラッド層414とは、合計で、300Å以上、1μm以下の厚さを有することが望ましく、1μm以下の厚さを有し得る。

【0139】第1のn型クラッド層上に設けられている第2のn型クラッド層424は、光閉じ込め層として作用するものであり、第1のn型クラッド層414よりもバンドギャップが大きく、かつアルミニウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体またはn型GaInで形成されている。このような第2のn型クラッド層424を設け

(18)

特開2002-141553

33

34

ることによって、第1のn型クラッド層414との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0140】この第2のn型クラッド層424は、n型Al_{1-x}Ga_xN（ここで、0<g<1）で形成する場合には、gの値は、0<g≤0.6の範囲内にあることが好ましい。AlGa_{1-x}Nはその結晶が比較的硬く、0.6より大きいと、第1のn型クラッド層414の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。gの値は、0<g≤0.4の範囲内にあることが最も好ましい。

【0141】また、第2のn型クラッド層424のキャリア濃度は、 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、特にAlGa_{1-x}Nの抵抗率が高くなるので、発光素子のV_fが高くなり、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いと特にAlGa_{1-x}Nの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。

【0142】第2のn型クラッド層424は、通常、500Åの厚さをもつて形成することができる。

【0143】n型半導体層の最外層（活性層から最も離れて位置する層）として形成されている（図12では、第2のn型クラッド層424に接して形成されている）n型コンタクト層403は、n型Ga_{1-x}Nで形成されている。図1の発光素子10におけるn型コンタクト層13をn型Ga_{1-x}Nで形成することが好ましいとした理由と同様の理由から、n型コンタクト層403は、n型Ga_{1-x}Nで形成される。その他の例えばキャリア濃度は、図1に示す発光素子10におけるn型コンタクト層13の場合に好ましいとして記載した濃度であることが同様に好ましい。

【0144】活性層405の第2の主面に接して設けられている第1のp型クラッド層416は、キャップ層として作用するものであり、これまで説明してきた他の形態における第1のp型クラッド層と同様に活性層の分解を防止して発光素子の発光出力を向上させるものである。この第1のp型クラッド層416は、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成されている。このような第1のp型クラッド層416を設けることによって、より一層優れたLED素子を提供できることがわかった。

【0145】この第1のp型クラッド層416は、好ましくは、p型Al_{1-x}Ga_xN（ここで、0<h<1）で形成される。この場合において、hの値は、0<h≤0.6の範囲内にあることが好ましい。AlGa_{1-x}Nはその結晶が比較的硬く、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからであ

る。h値は、0<h≤0.4の範囲内にあることが最も好ましい。

【0146】また、第1のp型クラッド層416のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、活性層405への正孔の注入効率が低下し、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いとAlGa_{1-x}Nの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。

【0147】第1のp型クラッド層416は、通常、500Åの厚さをもつて形成することができる。

【0148】第1のp型クラッド層416上に設けられている第2のp型クラッド層426は、光ガイド層として作用し、インジウムとガリウムを含むp型窒化物半導体またはp型Ga_{1-x}Nで形成されている。より具体的には、第1のp型クラッド層416は、p型In_zGa_{1-z}N（ここで、0≤z<1）で形成することが望ましい。図3の発光素子30における第1のp型クラッド層36に関して説明した理由と同様の理由から、z値は、0≤z≤0.5の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは0≤z≤0.3の範囲内、最も好ましくは0≤z≤0.2の範囲内にある。この第1のp型クラッド層416も同様にGa_{1-x}Nにより形成してもいわばバッファ層として同様に作用する。また、この第1のp型クラッド層416のキャリア濃度も、同様の理由から、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。さらに、第1のクラッド層416の厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層405との合計で、300Å以上の厚さを有することが望ましく、1μm以下の厚さを有し得る。

【0149】第2のp型クラッド層426上に設けられている第3のp型クラッド層436は、光閉じ込め層として作用し、第2のp型クラッド層426よりもバンドギャップが大きく、かつアルミニウムとガリウムを含むp型の窒化物半導体で形成されている。このような第3のp型クラッド層436を設けることによって、第2のp型クラッド層426との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0150】この第3のp型クラッド層436は、好ましくは、p型Al_{1-x}Ga_xN（ここで、0<i<1）で形成される。この場合において、iの値は、0<i≤0.6の範囲内にあることが好ましい。AlGa_{1-x}Nはその結晶が比較的硬く、0.6より大きいと、第2のp型クラッド層426の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。b値は、0<b≤0.4の範囲内にあることが最も好ましい。

(19)

特開2002-141553

35

【0151】また、第3のp型クラッド層436のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、活性層405への正孔の注入効率が低下し、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いとAlGaInの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。第3のp型クラッド層436は、通常、500Åの厚さをもつて形成することができる。

【0152】p型半導体層の最外層（活性層405から最も離れて位置する層）として形成されている（図12では、第3のp型クラッド層436に接して設けられている）p型コンタクト層407は、p型GaInで形成されている。図1の発光素子10におけるp型コンタクト層17をp型GaInで形成することが好ましいとした理由と同様の理由から、p型コンタクト層407は、p型GaInで形成される。その他の例えばキャリア濃度は、図1に示す発光素子10におけるp型コンタクト層17の場合に好ましいとして記載した濃度であることが同様に好ましい。

【0153】基板401、バッファ層402、負電極408および正電極409は、それぞれ、図1に示す発光素子10における基板11、バッファ層12、負電極18および正電極19について説明した通りのものである。また、透孔440aを有する電流狭窄層440についても、図9に示す発光素子90における電流狭窄層100について説明した通りのものである。

【0154】本発明の1つの側面によれば、第1および第2の主面を有し、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体よりなる量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して形成され、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型層、および該第1のp型層に接して設けられたp型GaInよりなる第2のp型層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。この側面による発光素子は、図9に示す発光素子90の構造から第2のp型クラッド層96bとn型クラッド層94を省略し、かつp型コンタクト層97をp型GaInで形成した特別の場合に該当する。この場合、n型コンタクト層93を最も好ましくはn型GaInで形成することができる。

【0155】図13は、量子井戸構造の活性層の井戸層の厚さを変えて本発明の種々の窒化物半導体発光素子を作製し、その発光出力（相対値）と井戸層の厚さとの関係調べた結果をグラフで示したものである。図13からわかるように、本発明の窒化物半導体発光素子における量子井戸構造の活性層の井戸層の厚さを700Å

36

以下にすると、発光素子の発光出力が顕著に向上することがわかる。井戸層の厚さが500Å以下となると、発光素子の発光出力は、さらに向上することもわかる。このような傾向は、本発明のすべての窒化物半導体発光素子について、単一量子井戸構造の活性層においても、多重量子井戸構造の活性層においても、確認されたばかりでなく、広く、活性層を挟持する2つのクラッド層の一方がp型窒化物半導体で形成され、他方がn型窒化物半導体で形成された場合にも確認された。

【0156】そこで、本発明の側面によれば、n型窒化物半導体層とp型窒化物半導体層との間にインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する少なくとも1層の井戸層を有する量子井戸構造の活性層を備え、井戸層は、700Å以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0157】図14は、多重量子井戸構造の活性層の井戸層の厚さを一定にし、障壁層の厚さを変えて本発明の種々の窒化物半導体発光素子を作製し、その発光出力（相対値）と障壁層の厚さとの関係調べた結果をグラフとして示したものである。図14からわかるように、本発明の窒化物半導体発光素子における量子井戸構造の活性層の障壁層の厚さを150Å以下にすると、発光素子の発光出力が顕著に向上することがわかる。障壁層の厚さが100Å以下となると、発光素子の発光出力は、さらに向上することもわかる。このような傾向は、本発明のすべての窒化物半導体発光素子について確認されたばかりでなく、広く、活性層を挟持する2つのクラッド層の一方がp型窒化物半導体で形成され、他方がn型窒化物半導体で形成された場合にも確認された。

【0158】図15は、図9に示す構造に類似する構造の発光素子について、第1のp型クラッド層96aの厚さを変えた場合におけるその厚さと発光出力（相対値）との関係を示すグラフである。図15は、より具体的には、図9に示す構造において、サファイア基板91上にGaInバッファ層92を介してn型GaInコンタクト層93を4μmの厚さに、n型InGaInクラッド層94を500Åの厚さに、単一量子井戸構造のInGaIn活性層95を200Åの厚さに形成し、その上に第1のp型AlGaInクラッド層96aを厚さを変えて形成し、さらにその上に第2のp型AlGaInクラッド層96bを0.1μmの厚さに形成し、p型GaInコンタクト層97を1μmの厚さに形成し、負電極98を形成し、電流狭窄層100を設けることなく正電極99を形成したLED素子についてのものである。

【0159】図15に示すように、第1のp型クラッド層96aの厚さが1μmより厚くなると発光出力は急激に低下する傾向にある。そのような厚さになると、第

(20)

特開2002-141553

37

1のp型クラッド層96aにクラックが入り、素子の結晶性が悪くなることによるものである。図15から、LED素子の場合には、第1のp型クラッド層96aの膜厚は100ナノメートル(0.001 μ m)以上、1 μ m以下の厚さが好ましいことがわかる。このような傾向は、第1のp型クラッド層をAlGaInで形成する本発明の他の形態の窒化物半導体発光素子のすべてについて確認された。なお、LED素子の場合に第1のp型クラッド層の好ましい厚さが100ナノメートル以上であるのは、上記の通り、別の理由による。

【0160】図16は、図10に示す構造に類似する構造の発光素子について、第1のn型クラッド層294aの厚さを変えた場合におけるその厚さと発光出力(相対値)との関係を示すグラフである。図16は、より具体的には、図10に示す構造において、サファイア基板91上にGaInバッファ層92を介してn型GaInコンタクト層93を4 μ mの厚さに、第2のn型AlGaInクラッド層294bを0.1 μ mの厚さに形成し、第1のn型InGaInクラッド層294aを厚さを変えて形成し、さらにその上に、単一量子井戸構造のInGaIn活性層95を200ナノメートルの厚さに、p型AlGaInクラッド層296を0.1 μ mの厚さに形成し、負電極98を形成し、電流狭窄層100を設けることなく正電極99を形成したLED素子についてのものである。

【0161】図16からわかるように、第1のn型クラッド層294aの厚さが1 μ mよりも厚くなると発光出力は急激に低下する傾向にある。これは第1のn型クラッド層294a自体の結晶性が悪くなり、例えば結晶が黒くなった、ビットが発生するためである。また第1のn型クラッド層294aの厚さが300ナノメートルよりも薄くなると、発光出力が低下する傾向にある。これはInGaInよりなる第1のn型クラッド層294aがバッファ層として効果的に作用する好ましい膜厚が300ナノメートル以上であることを示している。このような傾向は、第1のn型クラッド層をInGaInまたはGaInで形成する本発明の他の形態の窒化物半導体発光素子のすべてについて確認された。なお、既に説明したように、第1のn型クラッド層294aが100ナノメートルよりも薄くなると、バッファ層として作用せず、その上に形成される活性層95およびクラッド層294b、296に多数のクラックが発生するため、素子作製も難しくなり、発光出力は大幅に低下する。

【0162】さて、本発明において、窒化物半導体は、いずれも、ドナー不純物をドーピングしないで成長させてもn型を示すが、最も好ましくは窒化物半導体の結晶成長中にSi、Ge、Te、S等のドナー不純物をドーピングする。ドナー不純物濃度を調整することにより、n型窒化物半導体層のキャリア濃度を調整できる。

38

【0163】また、本発明において、p型窒化物半導体層は、いずれも、窒化物半導体の結晶成長中にMg、Zn、Cd、Ca、Be、C等のアクセプター不純物を窒化物半導体の結晶成長中にドーピングすることによって得られる。このようにアクセプター不純物をドーピングして成長させた窒化物半導体層を400℃以上の温度でアニーリングを行うことによりより一層好ましいp型窒化物半導体層が得られる。アクセプター不純物の濃度を調整することにより、p型窒化物半導体層のキャリア濃度を調整することができる。

【0164】本発明の窒化物半導体発光素子は、例えばMOVPE(有機金属気相成長法)、MBE(分子線気相成長法)、HDVPE(ハイドライド気相成長法)等の気相成長法を用いて、基板上に各窒化物半導体層を形成することによって好ましく製造することができる。例えば、有機インジウム化合物、有機ガリウム化合物、有機アルミニウム化合物、アンモニア等の窒化物半導体源を用い、必要に応じて不純物源をも用いて有機MOVPE法により基板上に各窒化物半導体層を形成し、正電極および負電極を形成して本発明の窒化物半導体発光素子を製造することができる。

【0165】以上、図面を参照して本発明の実施の形態を説明したが、本発明は、これらに限定されるものではない。例えば図9における電流狭窄層100は、LED素子とした場合における本発明の半導体発光素子にも適用できる。また、1つのn型もしくはp型InGaIn層についてのインジウムの比率およびキャリア濃度に関する説明は、他のn型もしくはp型InGaIn層についても同様にあてはまり、1つのn型もしくはp型AlGaIn層についてのアルミニウムの比率およびキャリア濃度に関する説明は、他のn型もしくはp型AlGaIn層についても同様にあてはまることが明らかであろう。なお、以上の説明からも明らかなように、主面とは、窒化物半導体層(具体的には、活性層)において他の層が形成される面を意味する。

【0166】

【実施例】以下本発明を実施例に基づいて説明する。以下の実施例では、全ての窒化物半導体層をMOVPE法により成長させている。

【0167】実施例1

まず、原料ガスとしてTMG(トリメチルガリウム)とNH₃とを用い、反応容器にセットしたサファイア基板のC面に500℃でGaInよりなるバッファ層を500ナノメートルの厚さに成長させた。

【0168】次に温度を1050℃まで上げ、TMGとNH₃、からなる上記原料ガスにシランガスを加え、Siドーピングn型GaInよりなるn型コンタクト層を4 μ mの厚さに成長させた。このn型コンタクト層の電子キャリア濃度は、 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ であった。

【0169】続いて、上記原料ガスにさらにTMA(ト

(21)

特開2002-141553

39

40

リメチルアルミニウム)を加え、同じく1050℃でSiドープn型Al_{0.1}Ga_{0.9}N層よりなる第2のn型クラッド層を0.1μmの厚さに成長させた。この第2のn型クラッド層の電子キャリア濃度は $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ であった。

【0170】次に、温度を800℃に下げ、原料ガスとしてTMG、TMI(トリメチルインジウム)、NH₃およびシランガスを用い、Siドープn型In_{0.05}Ga_{0.95}Nよりなる第1のn型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のn型クラッド層の電子キャリア濃度は、 $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ であった。

【0171】続いて、原料ガスとしてTMG、TMIおよびNH₃を用い、800℃でノンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nを30オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0172】次に、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、NH₃およびCp₂Mg(シクロペンタジエニルマグネシウム)を用い、Mgドープp型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nよりなる第2のp型クラッド層を0.1μmの厚さに成長させた。この第2のp型クラッド層のホールキャリア濃度は $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ であった。

【0173】続いて、原料ガスとしてTMG、NH₃およびCp₂Mgを用い、1050℃でMgドープp型Ga_{0.95}Nよりなるp型コンタクト層を0.5μmの厚さに成長させた。このp型コンタクト層のホールキャリア濃度は $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ であった。

【0174】しかる後、温度を室温まで下げ、ウェーハを反応容器から取り出し、700℃でウェーハのアニールングを行って各p型層をさらに低抵抗化させた。次に、最上層のp型コンタクト層の表面に所定の形状のマスクを形成し、n型コンタクト層の表面が露出するまでエッチングした。n型コンタクト層の露出表面にTiとAlよりなる負電極を形成し、p型コンタクト層の表面にNiとAuよりなる正電極を形成した。

【0175】電極形成後、ウェーハを350μm角のチップに分離した後、高圧に依り半値角15度の指向特性を持つLED素子とした。このLED素子はIf(順方向電流)20mAにおいて、Vf(順方向電圧)3.5V、発光ピーク波長415nmの青色発光を示し、発光出力は6mWであった。また、その発光スペクトルの半値幅は20nmであり、非常に色純度の良い発光を示した。

【0176】実施例2

実施例1と同様にしてサファイア基板の上にSiドープn型Al_{0.1}Ga_{0.9}N層よりなる第2のn型クラッド層まで成長させた後、第2のクラッド層の上に実施例1と同様の条件で、ノンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nを40オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造

の活性層を形成した。

【0177】次に、活性層の上に、原料ガスとしてTMG、TMI、NH₃およびCp₂Mgを用い、800℃で、Mgドープp型In_{0.05}Ga_{0.95}Nよりなる第1のp型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のp型層のアニール後のホールキャリア濃度は $2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ であった。

【0178】これ以降の第2のp型クラッド層、p型コンタクト層の成長、その他は実施例1と同様にして所望のLED素子を得た。このLED素子は、If20mAにおいて、Vf3.5V、発光ピーク波長410nm、発光スペクトルの半値幅20nmであり、発光出力は5mWであった。

【0179】実施例3

実施例1と同様にして、サファイア基板の上に、Siドープn型In_{0.05}Ga_{0.95}Nよりなる第1のn型クラッド層まで成長させた後、その第1のn型クラッド層の上に、ノンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nを40オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0180】続いて、原料ガスとしてTMG、TMI、NH₃およびCp₂Mgを用い、800℃で、Mgドープp型In_{0.05}Ga_{0.95}Nよりなる第1のp型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のp型クラッド層のアニール後のホールキャリア濃度は、 $2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ であった。

【0181】次に、実施例1と同様にして、第1のp型クラッド層上にMgドープp型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nよりなる第2のp型クラッド層を成長させ、そしてその上にMgドープp型Ga_{0.95}Nよりなるp型コンタクト層を成長させた。その後、実施例1と同様にして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、If20mAでVf3.5V、発光ピーク波長410nm、発光スペクトルの半値幅20nmであり、発光出力は6mWであった。

【0182】実施例4

実施例1と同様にして、サファイア基板の上に、Siドープn型Al_{0.1}Ga_{0.9}N層よりなる第2のn型クラッド層まで成長させた後、その第2のn型クラッド層の上に、Siドープn型Ga_{0.95}Nよりなる第1のn型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のn型クラッド層の電子キャリア濃度は $2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ であった。

【0183】次に、実施例3と同様に第1のn型クラッド層55の上に、ノンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nを40オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0184】次に、活性層の上に、実施例1と同様にして、Mgドープp型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nよりなる第2のp型クラッド層とMgドープp型Ga_{0.95}Nよりなるp型コンタクト層を順次成長させた。これ以降は実施例1と同

(22)

特開2002-141553

41

様にしてLED素子を得た。このLED素子は、 I_f 20 mAで V_f 3.5 V、発光ピーク波長415 nm、発光スペクトルの半値幅20 nmであり、発光出力は5 mWであった。

【0185】実施例5

活性層を $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ で形成した以外は実施例1と同様にしてLED素子を作製した。このLED素子は、 I_f 20 mAにおいて、 V_f 3.5 V、発光ピーク波長455 nm、半値幅20 nmの青色発光を示し、発光出力は5 mWであった。

【0186】実施例6

本実施例は、活性層の形成以外は実施例1と同様に行った。すなわち、本実施例では、活性層を形成するために、原料ガスとしてTMG、TMIおよび NH_3 を用い、800℃で、 Si ドープ n 型 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 薄膜（井戸層）を200 Åの厚さに成長させた。続いて、 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 薄膜（障壁層）を200 Åの厚さに成長させた。この操作を交互にそれぞれ3回ずつ繰り返し、最後に $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 薄膜（障壁層）を200 Åの厚さに成長させ、総膜厚1400 Åの多層量子井戸構造の活性層を形成した。こうして得られたLED素子は、 I_f 20 mAにおいて、 V_f 3.5 V、発光ピーク波長420 nmの青色発光を示し、発光出力は7 mWであった。

【0187】実施例7

アクセプター不純物源としてDEZ（ジエチルジンク）、ドナー不純物としてシランガスを用い、活性層として Si と Zn をドープした単一量子井戸構造の $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 層を500 Åの厚さに形成した以外は実施例1と同様にしてLED素子を作製した。このLED素子は I_f 20 mAにおいて、 V_f 3.5 V、発光ピーク波長450 nm、半値幅70 nmの青色発光を示し、発光出力3 mWであった。

【0188】実施例8

実施例1の手法に従い、 n 型コンタクト層の上に Si ドープ n 型 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ よりなる第1の n 型クラッド層、 Si ドープ $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ よりなる活性層、 Mg ドープ p 型 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ よりなる第2の p 型クラッド層、および Mg ドープ p 型 GaN よりなる p 型コンタクト層を成長させた。すなわち、第2の n 型クラッド層を形成しなかった以外は実施例1と同様にしてLED素子を得た。このLED素子は、 I_f 20 mAにおいて、 V_f 3.5 V、発光ピーク波長410 nm、発光出力は5 mWであった。

【0189】実施例9

実施例1と同様にして、サファイア基板の上に、 n 型コンタクト層までの各半導体層を成長させた後、温度を800℃に下げ、原料ガスとしてTMG、TMI、 NH_3 およびシランガスを用い、 Si ドープ n 型 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ よりなる薄膜を380 Åの厚さに成長させた。次に、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、 NH_3 およびシランガスを用い、 Si ドープ n 型 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ よりなる薄膜を390 Åの厚さに成長させた。これらの操作を20回繰り返し、 Si ドープ n 型 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 層と Si ドープ $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 層を交互に10層ずつ積層した n 型多層膜（第1の多層反射膜）を形成した。

42

次に、 n 型多層膜上に、実施例3と同様にして、第2の n 型クラッド層、第1の n 型クラッド層、活性層、第1の p 型クラッド層、および第2の p 型クラッド層を順次成長させた。

10 【0190】次に、 n 型多層膜上に、実施例3と同様にして、第2の n 型クラッド層、第1の n 型クラッド層、活性層、第1の p 型クラッド層、および第2の p 型クラッド層を順次成長させた。

【0191】次に、温度を800℃に設定して、原料ガスとしてTMG、TMI、 NH_3 および Cp 、 Mg を用い、第2の p 型クラッド層上に Mg ドープ p 型 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 層を380 Åの厚さに成長させた後、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、 NH_3 および Cp 、 Mg ガスを用い、 Mg ドープ p 型 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 層を390 Åの厚さに成長させた。これらの操作を繰り返し、 Mg ドープ p 型 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 層と Mg ドープ p 型 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 層とを交互に10層ずつ積層した p 型多層膜（第2の多層反射膜）を形成した。

【0192】ついで、 p 型多層膜上に、実施例1と同様にして、 p 型コンタクト層を成長させた。

【0193】こうして得られたウエーハについて、実施例1と同様にして窒化物半導体層をエッチングした後、最上層である p 型コンタクト層の表面に所定の形状のマスクを形成し、 n 型コンタクト層上に50 μmの幅で負電極を、 p 型コンタクト層上に10 μmの幅で正電極をそれぞれ形成した。このように n 型コンタクト層上に n 型多層膜を形成すると、負電極を形成する水平面が n 型多層膜よりも下、すなわち基板側となる。

【0194】次に、窒化物半導体層を形成していない方のサファイア基板面を研磨して基板の厚さを90 μmにし、サファイア基板表面の M 面（六方晶系において六角柱の側面に相当する面）をスクライプした。スクライプ後、ウエーハを700 μm角のチップに分割し、ストライプ型のLED素子を作製した。このLED素子は、ストライプ状の正電極と直交する窒化物半導体層面を光共振面としている。また、このLED素子の表面は、各電極表面を除き表面を SiO_2 よりなる絶縁膜（図示せず）で被覆されている。次に、このチップをヒートシンクに設置し、各電極をワイヤーボンドした後、常温でレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度1.5 kA/cm²で発振波長390 nmのレーザ発振が確認された。

【0195】実施例10

まず、原料ガスとしてTMGと NH_3 とを用い、反応容器にセットしたサファイア基板のC面に、500℃で、

50

(23)

特開2002-141553

43

GaNよりなるバッファ層を200オングストロームの厚さに成長させた。

【0196】次に、温度を1050℃まで上げ、TMGとNH₃との原料ガスにシランガスを加え、Siドープn型GaNよりなるn型コンタクト層を4μmの厚さに成長させた。

【0197】ついで、温度を800℃に下げ、上記原料ガスにさらにTMIを加え、Siドープn型In_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第1のn型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。

【0198】続いて、800℃で、第1のn型クラッド層上にノンドープIn_{0.5}Ga_{0.5}Nを20オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0199】次に、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、NH₃およびCp₂Mgを用い、Mgドープp型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第1のp型クラッド層を0.1μmの厚さに成長させた。

【0200】続いて、1050℃で、Mgドープp型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第2のp型クラッド層を0.5μmの厚さに成長させた。

【0201】引き続き、1050℃でMgドープGaNよりなるp型コンタクト層を1.0μmの厚さに成長させた。

【0202】反応終了後、温度を室温まで下げ、ウェーハを反応容器から取り出し、700℃でウェーハのアニーリングを行い、p型層をさらに低抵抗化させた。次に、最上層のp型コンタクト層からn型コンタクト層の表面が露出するまでエッチングした。エッチング後、p型コンタクト層の表面にSiO₂の層を被着し、これに透孔を設けて電流狭窄層とし、さらにその電流狭窄層上に、p型コンタクト層と透孔を介して接続するNiとAuよりなる正電極を形成した。また、n型コンタクト層の上記露出表面に、TiとAuよりなる負電極を形成した。

【0203】次に、窒化物半導体層を形成していない方のサファイア基板面を研磨して基板の厚さを90μmとし、サファイア基板のM面をスクライブして強制的に劈開し、レーザチップを得た。その劈開面に誘電体多層膜を設けた後、チップをヒートシンクに設置し、常温でレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度2.0kA/cm²で発振波長450nmのレーザ発振が確認された。

【0204】実施例11

実施例10と同様にして、サファイア基板上にGaNバッファ層を200オングストロームの厚さに、n型GaNよりなるn型コンタクト層を4μmの厚さに順次形成した。

【0205】次に、Siドープn型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第2のn型クラッド層を0.5μmの厚さに形

44

成した後、Siドープn型In_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第1のn型クラッド層71を500オングストロームの厚さに形成した。

【0206】次にノンドープIn_{0.5}Ga_{0.5}Nを20オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成し、その上にMgドープp型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第2のp型クラッド層を0.5μmの厚さに、ついでMgドープp型GaNよりなるp型コンタクト層を1μmの厚さに形成した。

10 【0207】これ以降は実施例10と同様にして、得られたLD素子のレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度2.0kA/cm²で発振波長450nmのレーザ発振が確認された。

【0208】実施例12

実施例10と同様にして、サファイア基板上にGaNバッファ層を200オングストロームの厚さに、n型GaNよりなるn型コンタクト層を4μmの厚さに順次形成した。

20 【0209】次に、Siドープn型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第2のn型クラッド層を0.5μmの厚さに形成した後、Siドープn型In_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第1のn型クラッド層を0.1μmの厚さに形成した。

【0210】ついで、ノンドープIn_{0.5}Ga_{0.5}Nを20オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成し、その上にMgドープp型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第1のp型クラッド層を0.1μmの厚さに成長させ、さらにMgドープp型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第2のp型クラッド層を0.5μmの厚さに成長させ、最後にMgドープp型GaNよりなるp型コンタクト層を0.5μmの厚さに成長させた。

30 【0211】これ以降は実施例10と同様にして、得られたLD素子のレーザ発振を試みたところ、実施例10および11のLD素子のしきい値電流密度よりも低いしきい値電流密度1.0kA/cm²で発振波長450nmのレーザ発振が確認された。

【0212】実施例13

この実施例は、第1のn型クラッド層および活性層の形成を除き、実施例12と同様に行った。すなわち、第1のn型クラッド層として、Siドープn型In_{0.5}Ga_{0.5}Nの代わりに、Siドープn型GaN層を0.1μmの厚さに成長させた。また、活性層を形成するために、ノンドープIn_{0.5}Ga_{0.5}N井戸層を30オングストロームの厚さに成長させ、その上にノンドープIn_{0.5}Ga_{0.5}N障壁層を50オングストロームの厚さに成長させるという操作を繰り返し、井戸層/障壁層/井戸層/障壁層/井戸層という5層構成で総膜厚190オングストロームの多重量子井戸構造の活性層を成長させた。

50 【0213】得られたLD素子について、実施例10と同様にしてレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密

(24)

特開2002-141553

45

度 0.9 kA/cm^2 で 500 nm のレーザ発振を示した。

【0214】実施例14

第1のp型クラッド層を形成した後、第2のp型クラッド層を形成することなくp型コンタクト層を形成した以外は実施例10と同様に、サファイア基板上にp型コンタクト層までの各半導体層を成長させた。得られたウエーハについて、実施例10と同様に、アニーリングによるp型窒化物半導体層の低抵抗化、およびp型コンタクト層からn型コンタクト層までのエッチングを行った後、p型コンタクト層上に、電流狭窄層を形成することなく、 N_i と Au よりなる正電極を直接形成し、n型コンタクト層の露出表面に Ti と Al よりなる負電極を形成した。こうして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、 $1\text{ f}20\text{ mA}$ において、 $V\text{ f}3.5\text{ V}$ 、発光波長 450 nm の青色発光を示し、発光出力は 6 mW であった。また、発光スペクトルの半値幅は 20 nm とシャープなバンド間発光を示した。

【0215】実施例15

実施例10と同様に、サファイア基板上にp型コンタクト層までの各半導体層を成長させた。得られたウエーハについて、実施例10と同様に、アニーリングによるp型窒化物半導体層の低抵抗化、およびp型コンタクト層からn型コンタクト層までのエッチングを行った後、p型コンタクト層上に、電流狭窄層を形成することなく、 N_i と Au よりなる正電極を直接形成し、n型コンタクト層の露出表面に Ti と Al よりなる負電極を形成した。こうして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、 $1\text{ f}20\text{ mA}$ において、 $V\text{ f}3.5\text{ V}$ 、発光波長 450 nm の青色発光を示し、発光出力は 6 mW と高出力であった。発光スペクトルの半値幅は 20 nm とシャープなバンド間発光を示した。

【0216】実施例16

実施例10と同様に、サファイア基板上に、 Ga N バッファ層を 200 オングストロームの厚さに、n型 Ga N よりなるn型コンタクト層を $4\text{ }\mu\text{m}$ の厚さに順次形成した。このn型コンタクト層は、本実施例のLED素子において第1のn型クラッド層としても作用する。

【0217】次に、n型コンタクト層の上に、ノンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を 30 オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0218】ついで、 Mg ドープp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第1のp型クラッド層を $0.05\text{ }\mu\text{m}$ の厚さに成長させ、その上に Mg ドープp型 Ga N よりなるp型コンタクト層を $0.5\text{ }\mu\text{m}$ の厚さに直接成長させた。

【0219】しかる後、実施例14と同様に、アニーリングによるp型窒化物半導体層の低抵抗化、およびp型コンタクト層からn型コンタクト層までのエッチングを行った後、p型コンタクト層上に N_i と Au よりなる正電極を直接形成し、n型コンタクト層の露出表面に

46

Ti と Al よりなる負電極を形成した。こうして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、 $1\text{ f}20\text{ mA}$ において、 $V\text{ f}3.5\text{ V}$ 、発光波長 450 nm の青色発光を示し、発光出力も 7 mW と高出力であった。発光スペクトルの半値幅は、 20 nm とシャープなバンド間発光を示した。

【0220】実施例17

活性層として $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を 50 オングストロームの厚さに成長させた以外は実施例16と同様の操作によりLED素子を得た。このLED素子は、このLED素子は、 $1\text{ f}20\text{ mA}$ において、 $V\text{ f}3.5\text{ V}$ 、発光波長 520 nm の緑色発光を示し、発光出力は 4 mW であり、発光スペクトルの半値幅は、 40 nm であった。

【0221】実施例18

活性層および第1のp型クラッド層の形成以外は実施例3と同じ操作を行ってLED素子を得た。すなわち、本実施例では、活性層を形成するために、第1のn型クラッド層上に井戸層としてノンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を 25 オングストロームの厚さに成長させ、その上に障壁層としてノンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を 50 オングストロームの厚さに成長させるという操作を13回繰り返す。最後に井戸層としてノンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を 25 オングストロームの厚さに成長させ、総厚 1000 オングストロームの多重量子井戸構造の活性層を形成した。また、第1のp型クラッド層として、 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を 500 オングストロームの厚さに成長させた。こうして得られたウエーハについて実施例9と同様の処理を行って所望のLED素子を得た。このLED素子は、しきい値電流密度 1.0 kA/cm^2 で 415 nm のレーザ発振を示した。

【0222】実施例19

活性層の形成以外は実施例3と同じ操作を行ってLED素子を得た。すなわち、本実施例では、活性層を形成するために、第1のn型クラッド層上に井戸層としてノンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を 25 オングストロームの厚さに成長させ、その上に障壁層としてノンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を 50 オングストロームの厚さに成長させるという操作を26回繰り返す。最後に井戸層としてノンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を 25 オングストロームの厚さに成長させ、総厚 1975 オングストロームの多重量子井戸構造の活性層を形成した。こうして得られたウエーハについて実施例9と同様の処理を行って所望のLED素子を得た。このLED素子は、室温、しきい値電流密度 1.0 kA/cm^2 で 415 nm のレーザ発振を示した。

【0223】実施例20

実施例16で得た青色LED素子と、実施例17で得た緑色LED素子と、従来の GaAs 系材料または AlInGaP 系の材料よりなる発光出力 3 mW 、 660 nm の赤色LEDとのそれぞれ一個づつを1ドットとする2

(25)

特開2002-141553

47

48

56×256画素のフルカラーLEDディスプレイを作製したところ、その白色の面輝度は1万cdであり、しかも色再現領域はテレビよりも広がった。

【0224】

【発明の効果】以上詳述したように、本発明によれば、発光出力が高く、発光スペクトルの半値幅が狭い窒化物半導体発光素子が提供される。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図2】本発明による窒化物半導体発光素子の他の形態の構造を示す概略断面図。

【図3】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図4】本発明による窒化物半導体発光素子の他の形態の構造を示す概略断面図。

【図5】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図6】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図7】本発明の窒化物半導体レーザ素子の構造の一例を示す斜視図。

【図8】本発明の窒化物半導体レーザ素子の他の構造を示す概略断面図。

【図9】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図10】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

10

*【図11】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図12】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図13】本発明の窒化物半導体発光素子における活性層の井戸層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

【図14】本発明の窒化物半導体発光素子における活性層の障壁層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

【図15】本発明の窒化物半導体発光素子におけるp型AlGaInクラッド層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

【図16】本発明の窒化物半導体発光素子におけるn型InGaInクラッド層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

【符号の説明】

11、91、401…基板

13、93、403…n型コンタクト層

20 14、21、34、54、501、94、294、29

4a、294b、414、412…n型クラッド層

15、95、405…活性層

16、36、41、56、502、96、96a、96

b、296、416、426、436…p型クラッド層

17、97、407…p型コンタクト層

18、98、408…負電極

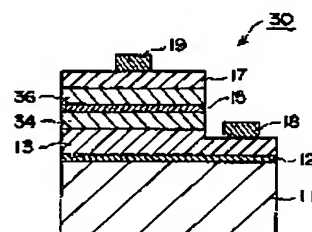
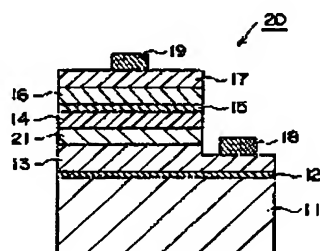
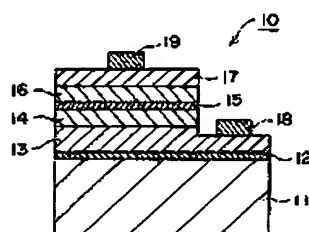
19、99、409…正電極

*

【図1】

【図2】

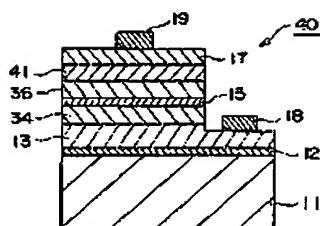
【図3】



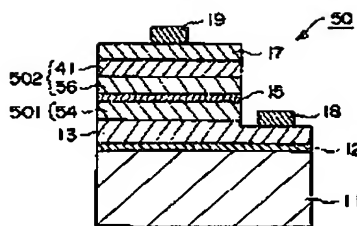
(26)

特開2002-141553

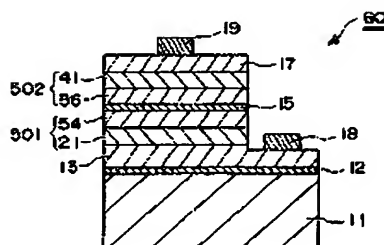
【図4】



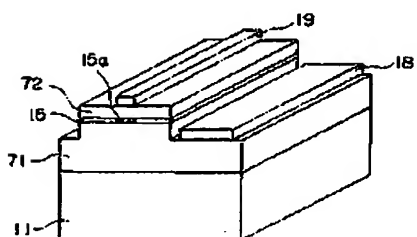
【図5】



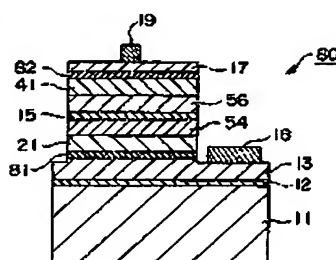
【図6】



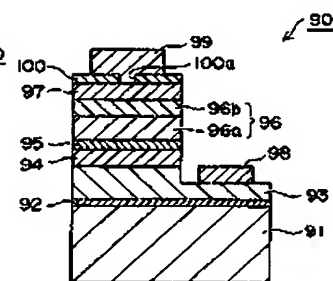
【図7】



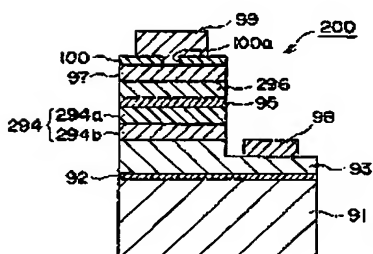
【図8】



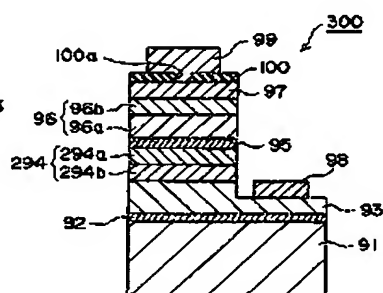
【図9】



【図10】



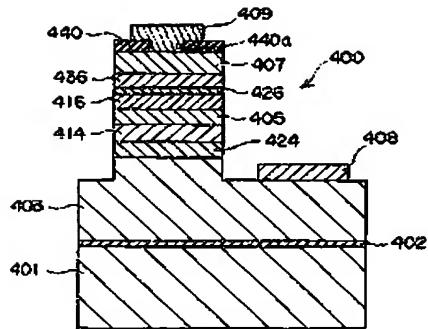
【図11】



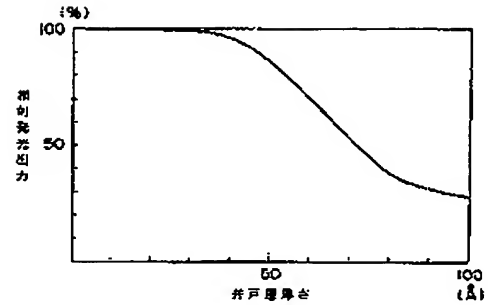
(27)

特開2002-141553

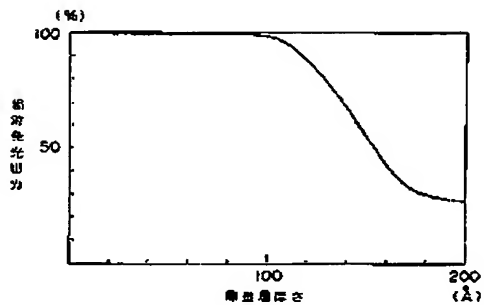
【図12】



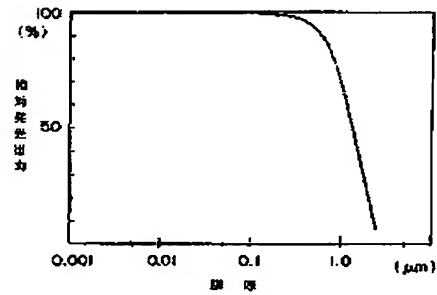
【図13】



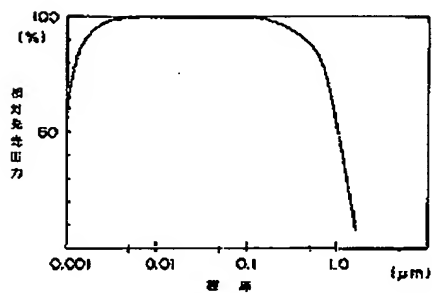
【図14】



【図15】



【図16】



フロントページの続き

(31)優先権主張番号 特願平7-118046
 (32)優先日 平成7年5月17日(1995. 5. 17)
 (33)優先権主張国 日本(JP)

(72)発明者 岩佐 成人
 徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化
 学工業株式会社内

(28)

特開2002-141553

(72)発明者 清久 裕之
徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化
学工業株式会社内

Fターム(参考) 5F041 AA03 AA04 AA11 CA05 CA40
5F073 AA55 AA73 AA74 CA02 CA07
CB06 EA03 EA24

特開2002-141553

【公報種別】特許法第17条の2の規定による補正の掲載
 【部門区分】第7部門第2区分
 【発行日】平成15年6月13日(2003. 6. 13)

【公開番号】特開2002-141553 (P2002-141553A)
 【公開日】平成14年5月17日(2002. 5. 17)
 【年号数】公開特許公報14-1416
 【出願番号】特願2001-282288 (P2001-282288)
 【国際特許分類第7版】

H01L 33/00
 H01S 5/343 610
 【F1】
 H01L 33/00 C
 H01S 5/343 610

【手続補正書】

【提出日】平成15年2月24日(2003. 2. 24)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正内容】

【書類名】 明細書

【発明の名称】 窒化物半導体発光素子

【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、

該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体またはn型Ga Nよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつ第1のn型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有する第2のn型クラッド層とを含み、

該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつ第1のp型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有し、かつアルミニウムとガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項2】 前記第1のn型クラッド層が、100nm以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする請求項1記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項3】 前記第1のn型クラッド層が、100nm以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする請求項1または2記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項4】 前記第1のp型クラッド層が、100nm以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする請求項1ないし3のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項5】 前記第1のp型クラッド層は、100nm以上、0.5μm以下の厚さを有することを特徴とする請求項1ないし4のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項6】 前記第2のp型クラッド層上に、正電極が形成されるp型コンタクト層を有することを特徴とする請求項1ないし5のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項7】 前記n型窒化物半導体層は、負電極が形成されるn型コンタクト層を有することを特徴とする請求項1ないし6のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項8】 第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、

該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体またはn型Ga Nよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Ga Nまたはアルミニウムとガリウムとを含む窒化物半導体よりなる第2のn型クラッド層とを含み、

該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接し

- 補 1 -

特開2002-141553

て設けられ、かつアルミニウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層を含み、該第1のp型クラッド層は、100オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子。

【請求項9】 前記p型窒化物半導体層が、第1のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型Ga_{0.5}Nまたはインジウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層をさらに含むことを特徴とする請求項8記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項10】 前記p型窒化物半導体層は正電極が形成されるp型コンタクト層を有し、該p型コンタクト層と第2のp型クラッド層との間に、互いに組成の異なる窒化物半導体で形成されるp型の多層光反射膜を有することを特徴とする請求項1ないし7及び請求項9のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項11】 前記p型窒化物半導体層は、正電極が形成されるp型コンタクト層を有することを特徴とする請求項8乃至10記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項12】 前記第1のn型クラッド層は、インジウムとガリウムを含む窒化物半導体であることを特徴とする請求項1ないし11のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項13】 前記n型窒化物半導体層は、負電極が形成されるn型コンタクト層を有し、該n型コンタクト層と第2のn型クラッド層との間に、互いに組成の異なる窒化物半導体で形成されるn型の多層光反射膜を有する請求項1ないし12のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項14】 前記多層光反射膜は、当該多層光反射膜を構成する窒化物半導体の少なくとも一つがインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体またはGa_{0.5}Nであることを特徴とする請求項10または13記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項15】 前記活性層が、厚さ100オングストローム以下の井戸層からなる単一量子井戸構造を構成することを特徴とする請求項1ないし14のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項16】 前記活性層が、インジウムおよびガリウムを含む窒化物半導体よりなる井戸層と窒化物半導体よりなる障壁層とを積層してなる多重量子井戸構造を構成することを特徴とする請求項1ないし14のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項17】 活性層が、ノンドープのものである請求項1ないし16のいずれか1項記載の窒化物半導体発光素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、発光ダイオード

(LED)、レーザダイオード(LD)等の半導体発光素子に係り、特に、基板上に積層される半導体層構造が窒化物半導体により構成される窒化物半導体発光素子に発光素子に関する。

【0002】

【従来の技術】 紫外から赤色領域までの波長領域に発光するLED、LD等の半導体発光素子の材料としてInGa_{0.5}N、AlGa_{0.5}N、Ga_{0.5}N等の窒化物半導体有望視されている。現在、これら窒化物半導体材料で構成された青色LED、青緑色LEDが実用化され、ディスプレイ、信号等に用いられている。

【0003】 これらの青色、青緑色発光窒化物半導体LED素子は、ダブルヘテロ構造を有し、基本的には、基板の上に、n型Ga_{0.5}Nよりなるn型コンタクト層と、n型AlGa_{0.5}Nよりなるn型クラッド層と、n型InGa_{0.5}Nよりなる活性層と、p型AlGa_{0.5}Nよりなるp型クラッド層と、p型Ga_{0.5}Nよりなるp型コンタクト層とが順次積層された構造を有している。活性層には、Si、Ge等のドナー不純物および/またはZn、Mg等のアクセプター不純物がドーピングされている。このLED素子の発光波長は、活性層を構成するInGa_{0.5}NのInの比率を変えるか、または活性層にドーピングする不純物の種類を変えることにより、紫外から赤色領域まで変化させることができる。

【0004】 他方、LD素子については、従来より種々の構造が提案されている。例えば特開平6-21511号公報には、分離開じ込め型のLD素子が開示されている。このLD素子は、InGa_{0.5}Nよりなる膜厚100オングストローム以下の活性層をn型Ga_{0.5}N層とp型Ga_{0.5}N層とにより挟持し、さらにn型Ga_{0.5}N層およびp型Ga_{0.5}N層のそれぞれの上にp型AlGa_{0.5}N層およびn型AlGa_{0.5}N層を設けた構造を有する。この素子において、AlGa_{0.5}N層が光閉じ込め層として作用している。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】 窒化物半導体LED素子については、上に述べたようなダブルヘテロ構造が実現されたことにより、発光出力は実用レベルまで向上するに至っている。しかしながら、LED素子であってもさらに高い発光出力を示す素子が望ましいばかりでなく、従来のLED素子においては、活性層(発光層)に不純物がドーピングされているために、発光スペクトルの半値幅が広くなるきらいがある。発光スペクトルの半値幅が広いと、その発光色は白色味を帯びて見えるので、そのようなLED素子を用いて例えばフルカラーディスプレイを作製した際には、そのカラーディスプレイの色再現領域が狭くなることとなる。

【0006】 他方、窒化物半導体LD素子は、前記特開平6-21511号公報に記載されているように、ノンドープのInGa_{0.5}Nで形成された活性層を有するダブルヘテロ構造により、理論的には、実現可能であるが、実

- 2 -

特開2002-141553

際にはそのLED素子は発振するには至っていない。特にこの公報に記載されているように、活性層を量子井戸構造とすることにより、発光出力が大幅に向上するはずであるが、前述のように、実際はレーザ発振するに至っていない。

【0007】従って、本発明は、LED素子に適用した場合には、発光出力が高く、発光スペクトルの半値幅が狭いLED素子を実現でき、またLED素子に適用した場合には、現実のレーザ発振を行えるLED素子を実現できる新規な構造の窒化物半導体発光素子を提供することを課題とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】本発明者らは、活性層をp型半導体層とn型半導体層で挟持した構造の窒化物半導体発光素子について鋭意研究した結果、活性層をInGa_Nで形成するとともに、これを量子井戸構造（単一量子井戸および多重量子井戸構造の双方を含む）とすることによって当該活性層からの発光をInGa_Nのバンド間発光に基づくものとすることができ、もって半値幅の狭い発光を得ることができ、および特定のp型層またはn型層を当該活性層に接して設けることによって、高い発光出力を示すおよび／または現実のレーザ発振を行える窒化物半導体発光素子が得られることを見いだした。これらの知見に基づいてさらに研究を進め、本発明を完成するに至った。

【0009】より具体的には、本発明の第1の側面によれば、第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_Nよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつ第1のn型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有する第2のn型クラッド層とを含み、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層と、該第1のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、該第1のp型クラッド層よりも大きなバンドギャップを有し、かつアルミニウムとガリウムを含むp型の窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層とを含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0010】前記第1のn型クラッド層は、10オングストローム以上、1.0μm以下、より好ましくは、100オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することが望ましい。

【0011】前記第1のp型クラッド層は、10オング

ストローム以上、1.0μm以下、より好ましくは、100オングストローム以上、0.5μm以下の厚さを有することが望ましい。

【0012】前記第2のp型クラッド層上に、正電極が形成されるp型コンタクト層を有することが好ましく、前記n型窒化物半導体層は、負電極が形成されるn型コンタクト層を有することが好ましい。

【0013】本発明の第2の側面によれば、第1および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該n型窒化物半導体層は、該活性層の第1の主面に接して設けられ、かつインジウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_Nよりなる第1のn型クラッド層と、該第1のn型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつn型Ga_Nまたはアルミニウムとガリウムとを含む窒化物半導体よりなる第2のn型クラッド層とを含み、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して設けられ、かつアルミニウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層を含み、該第1のp型クラッド層は、10オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0014】この窒化物半導体発光素子において、第1のp型クラッド層よりも活性層から離れた位置に設けられ、かつp型Ga_Nまたはインジウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体よりなる第2のp型クラッド層をさらに含むことが好ましい。

【0015】また、前記p型窒化物半導体層は、正電極が形成されるp型コンタクト層を有することが好ましい。

【0016】また、第1及び第2の側面の窒化物半導体発光素子において、前記第1のn型クラッド層は、インジウムとガリウムを含む窒化物半導体であることが好ましい。

【0017】前記n型窒化物半導体層は、負電極が形成されるn型コンタクト層を有し、該n型コンタクト層と第2のn型クラッド層との間に、互いに組成の異なる窒化物半導体で形成されるn型の多層光反射膜を有することが好ましい。同様に、前記p型窒化物半導体層は正電極が形成されるp型コンタクト層を有し、該p型コンタクト層と第2のp型クラッド層との間に、互いに組成の異なる窒化物半導体で形成されるp型の多層光反射膜を有することが好ましい。

【0018】前記多層光反射膜は、当該多層光反射膜を構成する窒化物半導体の少なくとも一つがインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体またはGa_Nであると有利である。

特開2002-141553

【0019】また、前記活性層は、厚さ100オングストローム以下の井戸層からなる単一量子井戸構造、インジウムおよびガリウムを含む窒化物半導体よりなる井戸層と窒化物半導体よりなる障壁層とを積層してなる多重量子井戸構造、とすることができる。活性層は、ノンドープのものであることが好ましい。

【0020】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。なお、全国に渡り、しばしば、同様の部分は、同一符号をもって示されている。

【0021】図1は、本発明の一態様による窒化物半導体発光素子の構造を示す概略断面図である。

【0022】図1に示す窒化物半導体発光素子10は、活性層15、並びに活性層15を両側で挟んでいる第1のn型クラッド層14およびp型クラッド層16からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層12およびn型コンタクト層13を介して、基板11上に設けられている。

【0023】活性層15は、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する。インジウムとガリウムを含む窒化物半導体は、 $\text{In}_m\text{Al}_n\text{Ga}_{1-m-n}\text{N}$ （ここで、 $0 < m < 1$ 、 $0 \leq n < 1$ ）で示することができる。最も好ましくは、活性層15は、式 $\text{In}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ （ここで、 $0 < m < 1$ ）で示される窒化物半導体を包含する。インジウムの比率、すなわち各式におけるmの値を変えることにより、紫外から赤色までの領域の発光光を得るようにバンドギャップを変えることができる。なお、以下の記載において、式 $\text{In}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ （ここで、 $0 < m < 1$ ）または同等の式をもって表される窒化物半導体を単に InGaN と表示することがある。

【0024】活性層15は、量子井戸構造のものである。活性層15を量子井戸構造にすることにより、LED素子であれ、LD素子であれ、歪量子井戸効果、エキシトン発光効果等により、高出力の発光素子が実現できる。

【0025】本発明において、量子井戸構造とは、活性層を構成する窒化物半導体（ InGaN ）の量子単位間発光を生じさせる構造をいい、単一量子井戸構造および多重量子井戸構造の双方を含む概念である。

【0026】単一量子井戸構造とは、井戸層が単一組成の窒化物半導体の一層からなる構造を指す。すなわち、単一量子井戸構造の活性層は、単一の井戸層だけで構成され、この活性層（すなわち、例えば、単一組成の InGaN からなる）を両側で挟持する2つのクラッド層が障壁層を構成することとなる。

【0027】また、多重量子井戸構造とは、井戸層と障壁層とを順次積層した多層構造を指す。多重量子井戸構造の最少積層構造は、1つの障壁層とこの障壁層の両側に設けられた（2つの）井戸層とからなる3層構造または1つの井戸層とその両側に設けられた（2つの）障

壁層とからなる3層構造であり得る。多重量子井戸構造において、両側の2つ最外層は、それぞれ井戸層または障壁層により構成される。活性層の2つ最外層がそれぞれ井戸層によって構成される多重量子井戸構造の場合には、当該活性層を両側で挟持する2つのクラッド層が障壁層を構成する。この多重量子井戸構造の活性層において、井戸層および障壁層は、両者をインジウムとガリウムを含む窒化物半導体（好ましくは InGaN ）で形成することができる（ただし、両者の組成は異なる）が、井戸層をインジウムとガリウムを含む窒化物半導体（好ましくは、 InGaN ）で形成し、障壁層を他の窒化物半導体で、例えば InN や GaN で形成することでもできる。すなわち、この多重量子井戸構造の活性層も、インジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する。

【0028】活性層15は、単一量子井戸構造の場合では井戸層を100オングストローム以下の厚さに形成し、多重量子井戸構造の場合では各井戸層を100オングストローム以下の厚さにかつ各障壁層を150オングストローム以下の厚さに形成することが好ましい。いずれの場合でも、井戸層は70オングストローム以下の厚さを有することがさらに好ましく、50オングストローム以下の厚さを有することが最も好ましい。活性層中の障壁層は、100オングストローム以下の厚さに形成することがさらに好ましい。多重量子井戸構造の活性層は、200オングストローム以上の厚さを有することが特に好ましく、通常、0.5 μm までの厚さを有し得る。

【0029】単一量子井戸構造、多重量子井戸構造いずれの活性層15においても、活性層はn型、p型いずれでもよいが、特にノンドープ（不純物無添加）とすることにより半導体の狭いバンド間発光、励起子発光、あるいは量子井戸発光が得られるので、特に好ましい。

【0030】活性層15にドナー不純物および/またはアクセプター不純物をドーピングする場合、当該不純物をドーピングした活性層の結晶性がノンドープの活性層の結晶性と実質的に同じであれば、ドナー不純物をドーピングした活性層は、ノンドープの活性層よりもバンド間発光強度がさらに強くなり得、他方、アクセプター不純物をドーピングした活性層は、本来のバンド間発光のピーク波長よりも約0.5 eV低エネルギー側にシフトした発光ピーク波長を示すが、半値幅は広くなる傾向にある。また、アクセプター不純物とドナー不純物の双方をドーピングすると、アクセプター不純物のみドーピングした活性層の発光強度をさらに増大させることができる。特にアクセプター不純物をドーピングした活性層を得ようとする場合、活性層の導電型はS₁等のドナー不純物をもドーピングしてn型とすることが好ましい。

【0031】しかしながら、本発明においては、活性層はバンド間発光により強力に発光するのが理想であるので、活性層15には不純物をドーピングしないことが最も好

特開2002-141553

ましい。また、ノンドープの活性層を有する発光素子は、不純物をドーパした活性層を有する発光素子よりも V_f (順方向電圧) を低くすることができる。

【0032】活性層15の第1の主面に接して設けられている第1のn型クラッド層14は、インジウムとガリウムを含むn型の窒化物半導体で形成される。InとGaを含む窒化物半導体は、結晶が比較的柔らかいので、いわばバッファ層として作用し、以下にも述べるように、活性層15およびそれ自体に、あるいはその上に形成され得る他の窒化物半導体層にクラックを生じにくくさせてそれらの結晶性を悪化させず、もって発光素子の発光出力を向上させる。第1のn型クラッド層14は、n型 $\text{In}_j\text{Ga}_{1-j}\text{N}$ ($0 < j < 1$) で形成することが望ましい。この $\text{In}_j\text{Ga}_{1-j}\text{N}$ において、jの値は、 $0 < j \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましい。一般に InGaN は、Inの比率を多くするに従い、結晶性が次第に悪くなる傾向にあり、n型クラッド層として当該発光素子に実用的に発光出力の高い発光を行わせるためには、j値が0.5以下であることが好ましいのである。j値は、さらに好ましくは $0 < j \leq 0.3$ 、最も好ましくは $0 < j \leq 0.2$ の範囲内にある。

【0033】また、第1のn型クラッド層14のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。n型クラッド層14中のキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも少ないと活性層15への電子注入効率が低下し、発光出力が低下する傾向にあり、他方n型クラッド層14中のキャリア濃度が $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ よりも大きいと第1のn型クラッド層の結晶性が悪くなり、発光出力が低下する傾向にあるからである。

【0034】第1のn型クラッド層14は、その厚さに特に制限はないが、活性層15と第1のn型クラッド層14とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましい。InとGaを含む窒化物半導体層(活性層+第1のn型クラッド層)の総厚が300オングストロームよりも薄いと、活性層15および第1のn型クラッド層14に、さらには第1のn型クラッド層に接して設けられる別の窒化物半導体層に、格子定数不整合、熱膨張率の差等によりそれらの界面に存在し得る歪応力によって、クラックが生じやすくなるからである。上にも述べたように、InとGaを含む窒化物半導体は、その結晶が比較的柔らかいので、この応力を緩和させるのに有益であるが、その総厚を300オングストローム以上の厚さに形成することにより、当該応力をより一層緩和させるようになる。この総厚は、1 μm 以下であることが好ましい。

【0035】活性層15の第2の主面に接して形成されているp型クラッド層16は、p型窒化物半導体で形成される。そのような窒化物半導体は、式 $\text{In}_s\text{Al}_t\text{Ga}_{1-s-t}\text{N}$ (ここで、 $0 \leq s$ 、 $0 \leq t$ 、 $s+t \leq 1$) で

示することができる。

【0036】基板11は、サファイア(C面、R面、A面を含む)、SiC(6H-SiC、4H-SiCを含む)、Si、ZnO、GaAs、スピネル(MgAl₂O₄)、特にその(111)面、GaN、窒化物半導体と格子定数の近い窒化物単結晶等で形成することができるが、一般的には、サファイア、スピネル、GaNまたはSiCが使用される。

【0037】基板11上に形成されているバッファ層12は、基板11とその上に形成される窒化物半導体層との格子不整合を緩和するために通常形成されるものであり、例えばGaN、AlN、GaAlN等により数百オングストロームの厚さに形成される。なお、基板11がその上に形成される窒化物半導体と格子定数が近いSiCやZnOのような材料で形成されている場合、また基板11がその上に形成される窒化物半導体と格子整合している場合には、このバッファ層12は形成されないこともある。

【0038】バッファ層12上には、第1のn型クラッド層14にも接してn型コンタクト層13が形成されている。このn型コンタクト層13は、GaN、AlGaIn等で形成することが好ましい。

【0039】基板11に所定の各半導体層を形成した後、エッチングにより露出されたn型コンタクト層の表面上には、負電極18が形成されている。

【0040】n型コンタクト層13は、GaNで形成すると、負電極18とのより一層好ましいオーミックコンタクトが達成され、発光素子の順方向電圧(V_f)をより一層低下させる。また、GaNはその結晶性が他の三元混晶、四元混晶の窒化物半導体と比べて優れているため、その上に成長させる第1のn型クラッド層14等の窒化物半導体層の結晶性を向上させることができるので、発光素子の発光出力を向上させる。

【0041】また、n型コンタクト層13のキャリア濃度は、負電極18との好ましいオーミック接触の達成およびその結果としての V_f の低下並びに発光出力の低下防止の観点から、 $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。

【0042】負電極18は、n型コンタクト層13との好ましいオーミックコンタクトの達成の観点から、チタン(Ti)と金(Au)とを含む金属材料、例えばそれらの積層構造または合金、またはTiとアルミニウム(Al)とを含む金属材料、例えばそれらの積層構造または合金で形成することが最も好ましい。この場合において、負電極18は、n型GaNコンタクト層13に直接接して設けられたチタン層とその上に形成されたアルミニウム層との2層構造として形成することが特に好ましい。

【0043】p型クラッド層16上には、p型コンタクト層17が形成され、その上には、正電極19が形成さ

特開2002-141553

れている。p型コンタクト層17は、Ga_{1-x}Al_xGaN等で形成することが好ましい。特にp型コンタクト層17をGa_{1-x}Nで形成すると、正電極19とのより一層好ましいオーミックコンタクトが達成され、発光素子のV_fを低下させることができる。

【0044】正電極19との好ましいオーミック接触の達成およびその結果としてのV_fの低下並びに発光出力の低下防止の観点から、p型コンタクト層17のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。

【0045】正電極19は、p型コンタクト層17との好ましいオーミックコンタクトの達成の観点から、ニッケル(Ni)と金(Au)とを含む金属材料、例えばそれらの積層構造または合金で形成することが最も好ましい。この場合において、正電極19は、p型Ga_{1-x}Nコンタクト層17に直接接して設けられたニッケル層とその上に形成された金層との2層構造として形成することが特に好ましい。

【0046】図2は、本発明の窒化物半導体発光素子の別の態様を示す。

【0047】図2に示す発光素子20は、第1のn型クラッド層14とn型コンタクト層13との間に、第2のn型クラッド層21を設けた以外は、図1に示す窒化物半導体素子と同様の構造を有する。

【0048】この発光素子20において、図1に示す発光素子構造に付加して設けられている第2のn型クラッド層21は、アルミニウムとガリウムを含むn型窒化物半導体で形成されている。このような第2のn型クラッド層21を設けることによって、第1のn型クラッド層14との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0049】この第2のn型クラッド層21は、好ましくは、n型Al_{1-x}Ga_xN（ここで、 $0 < x < 1$ ）で形成される。この場合において、xの値は、 $0 < x \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。Al_{1-x}Ga_xNはその結晶が比較的硬く、 0.6 より大きいと、第1のn型クラッド層14の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。xの値は、 $0 < x \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。なお、本明細書において、Al_{1-x}Ga_xNまたは同等の式をもって表される窒化物半導体を単にAl_{1-x}Ga_xNと表示することがある。

【0050】また、第2のn型クラッド層21のキャリア濃度は、 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、Al_{1-x}Ga_xNの抵抗率が高くなるので、発光素子のV_fが高くなり、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いとAl_{1-x}Ga_xNの結晶性が悪くなり、発光効率が低下するからである。第2のn型クラッド層

21は、通常、500Å～0.5μmの厚さをもって形成することができる。

【0051】基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、n型クラッド層14、活性層15、p型クラッド層16、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に関して説明した通りのものである。

【0052】図3は、本発明による窒化物半導体発光素子の他の構造を示す概略断面図である。

【0053】図3に示す窒化物半導体発光素子30は、活性層15、並びに活性層15を両側で挟んでいるn型クラッド層34および第1のp型クラッド層36からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、図1に示す構造と同様、バッファ層12およびn型コンタクト層13を介して、基板11上に設けられている。

【0054】活性層15の第2の主面に接して設けられている第1のp型クラッド層36は、インジウムとガリウムとを含むp型の窒化物半導体で形成される。InとGaを含む窒化物半導体は、結晶が比較的柔らかいので、いわばバッファ層として作用し、以下にも述べるように活性層15およびそれ自体に、あるいはその上に形成され得る他の窒化物半導体層にクラックを生じにくくさせてそれらの結晶性を悪化させず、もって発光素子の発光出力を向上させる。第1のp型クラッド層36は、p型In_{1-k}Ga_kN（ $0 < k < 1$ ）で形成することが望ましい。このIn_{1-k}Ga_kNにおいて、kの値は、 $0 < k \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましい。一般にInGa_{1-x}Nは、Inの比率を多くするに従い、結晶性が次第に悪くなる傾向にあり、p型クラッド層として当該発光素子に実用的に発光出力の高い発光を行わせるためには、k値が0.5以下であることが好ましいのである。k値は、さらに好ましくは $0 < k \leq 0.3$ 、最も好ましくは $0 < k \leq 0.2$ の範囲内にある。

【0055】また、第1のp型クラッド層36のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。第1のp型クラッド層36中のキャリア濃度が $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも少ないと活性層15への電子注入効率が低下し、発光出力が低下する傾向にあり、他方p型クラッド層36中のキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも大きいと第1のp型クラッド層の結晶性が悪くなり、発光出力が低下する傾向にあるからである。第1のp型クラッド層36は、図1に示す構造におけるp型クラッド層16に関して述べた方法により好ましく得られる。

【0056】第1のp型クラッド層36は、その厚さに特に制限はないが、活性層15と第1のp型クラッド層36とは、合計で、300Å以上の厚さを有することが望ましい。InとGaとを含む窒化物半導体層（活性層+第1のp型クラッド層）の総厚が300Åよりも薄いと、活性層15および第

特開2002-141553

1のp型クラッド層36に、さらには第1のp型クラッド層に接して設けられる別の窒化物半導体層に、格子定数不整、熱膨張率の差等によりそれらの界面に存在し得る歪応力によって、クラックが生じやすくなるからである。上にも述べたように、InとGaを含む窒化物半導体は、その結晶が比較的柔らかいので、この応力を緩和させるのに有益であるが、その総厚を300オングストローム以上の厚さに形成することにより、当該応力をより一層緩和させるようになる。この総厚は、1 μ m以下であることが好ましい。

【0057】活性層15の第1の主面に接して形成されているn型クラッド層34は、n型窒化物半導体で形成される。そのような窒化物半導体は、式In_uA_{1-u}Ga_vN_{1-v}（ここで、0 \leq u、0 \leq v、u+v \leq 1）で示すことができる。

【0058】基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、活性層15、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に関して説明した通りのものである。

【0059】図4は、本発明による窒化物半導体発光素子の別の態様を示す。

【0060】図4に示す発光素子40は、第1のp型クラッド層36とp型コンタクト層17との間に、第2のp型クラッド層41を設けた以外は、図3に示す窒化物半導体素子と同様の構造を有する。

【0061】この発光素子40において、図3に示す発光素子構造に付加して設けられている第2のp型クラッド層41は、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成されている。このような第2のp型クラッド層41を設けることによって、第1のp型クラッド層36との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0062】この第2のp型クラッド層41は、好ましくは、p型Al_{1-b}Ga_bN_{1-b}（ここで、0<b<1）で形成される。この場合において、bの値は、0<b \leq 0.6の範囲内にあることが好ましい。AlGa_{1-b}Nは、その結晶が比較的硬く、0.6より大きいと、第1のp型クラッド層36の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。bの値は、0<b \leq 0.4の範囲内にあることが最も好ましい。

【0063】また、第2のp型クラッド層41のキャリア濃度は、1 \times 10¹⁷/cm³～1 \times 10¹⁹/cm³の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が1 \times 10¹⁷/cm³よりも低いと、活性層15への正孔の注入効率が低下し、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が1 \times 10¹⁹/cm³よりも高いとAlGa_{1-b}Nの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。第2のp型クラッド層41は、通常、50オングストローム～0.5 μ mの厚さをもって形成するこ

とができる。

【0064】基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、活性層15、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に関して説明した通りのものであり、n型クラッド層34および第1のp型クラッド層36は、図3に関して説明した通りのものである。

【0065】図5は、本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図である。

【0066】図5に示す窒化物半導体発光素子50は、活性層15、並びに活性層15をその両側で挟む第1のn型クラッド層54を含むn型半導体層501および第2のp型クラッド層41を含むp型半導体層502からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、図1に示す構造と同様、バッファ層12およびn型コンタクト層13を介して、基板11上に設けられている。図5では、n型半導体層501は、第1のn型クラッド層54により構成されている。

【0067】この発光素子50は、図1に示す発光素子10におけるn型クラッド層構造と図4に示すp型クラッド層構造を組み合わせた半導体積層構造を有するものといえるが、この特別の場合においては、第1のn型クラッド層54は、図1に示す第1のn型クラッド層14を構成するインジウムとガリウムを含む窒化物半導体ばかりでなく、Ga_{1-x}Nによってもこれを形成でき、同様の効果を奏することがわかった。また、この場合には、第1のp型クラッド層56は、図1に示す発光素子10におけるp型クラッド層16と同様、いずれのp型窒化物半導体で形成してもよいこともわかった。このような半導体積層構造によっても、発光素子は同様の優れた特性を示す。

【0068】より詳しく説明すると、第1のn型クラッド層54は、アルミニウムを含まないn型窒化物半導体により形成される。この第1のn型クラッド層54は、n型In_wGa_{1-w}N_{1-w}（ここで、0 \leq w<1）で形成することが好ましい。すなわち、この第1のn型クラッド層54は、図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明したn型窒化物半導体で形成することもできるし、n型Ga_{1-w}Nで形成することができる。図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明した理由と同様の理由から、wの値は、0 \leq w \leq 0.5の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは0<w \leq 0.3、最も好ましくは0<w \leq 0.2の範囲内にある。第1のn型クラッド層54のキャリア濃度も、同様の理由から、1 \times 10¹⁷/cm³～1 \times 10¹⁹/cm³の範囲内にあることが望ましい。第1のn型クラッド層54も、その厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層15と第1のn型クラッド層54とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましく、1 μ m以下の厚さ

- 給 7 -

特開2002-141553

を有し得る。

【0069】図5に示す発光素子50において、活性層の第2の主面に接して形成されている第1のp型クラッド層56は、いずれのp型窒化物半導体で形成してもよいが、アルミニウムを含まないp型窒化物半導体で形成することが好ましい。より具体的には、第1のp型クラッド層56は、 $p\text{-type } \text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ （ここで、 $0 \leq x < 1$ ）で形成することが望ましい。図3の発光素子30における第1のp型クラッド層36に関して説明した理由と同様の理由から、 x 値は、 $0 \leq x \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは $0 \leq x \leq 0.3$ の範囲内、最も好ましくは $0 \leq x \leq 0.2$ の範囲内にある。この第1のp型クラッド層56も同様にGa_{0.5}Nにより形成してもいわずバフファ層として同様に作用する。また、この第1のp型クラッド層56のキャリア濃度も、同様の理由から、 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。さらに、第1のクラッド層56の厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層15との合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましく、1μm以下の厚さが好ましい。なお、この第1のp型クラッド層56は省略してもよいが、これを形成すれば、第1のp型クラッド層がバフファ層として作用するのでクラックが生じにくくなり、その発光素子は、より一層優れた特性を示すことは明らかである。

【0070】第2のp型クラッド層41は、図4に示す発光素子40における第2のクラッド層41について説明した通りのものである。

【0071】また、基板11、バフファ層12、n型コンタクト層13、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に示す発光素子10に関して説明した通りのものである。

【0072】図6は、本発明による半導体発光素子のさらに別の形態の構造を示す概略断面図である。この発光素子60は、n型コンタクト層13と第1のn型クラッド層54との間に、第2のn型クラッド層21が追加形成されている以外は、図5に示す発光素子50と同様の構造を有する。この第2のn型クラッド層21は、図2に示す発光素子20における第2のn型クラッド層21について説明した通りのものである。なお、第1のp型クラッド層56は、省略するよりも、これを設けた方が好ましいことも、図5に示す発光素子50の場合と同様である。

【0073】以上、本発明による窒化物半導体発光素子についていくつか説明したが、これら発光素子の構造は、LED素子にも、LD素子にも適用できることはいうまでもない。LDの構造は、例えば図7に斜視図として示す構造をとる。図7において、基板11上の半導体層71は、上記バフファ層12、n型コンタクト層13、第1のn型クラッド層および形成された場合の第2

のn型層からなる半導体層である。活性層15上に形成されている半導体層72は、上記形成された場合の第1のクラッド層および第2のクラッド層並びにp型コンタクト17層からなる半導体層である。印加された電流は、活性層15において、正電極19に対応する領域15aに集中して流れる。

【0074】なお、LD素子の場合には、上記発光素子10ないし60のいずれかの第1のn型クラッド層とn型コンタクト層13との間、第2のn型クラッド層が形成されている場合には、その第2のn型クラッド層とn型コンタクト層13との間に、および/または上記発光素子10ないし60のいずれかの第1のp型クラッド層とp型コンタクト層17との間、第2のp型クラッド層が形成されている場合には、その第2のp型クラッド層とn型コンタクト層13との間に、互いに組成の異なる少なくとも2種類の窒化物半導体層を積層してなる多層膜を光反射膜として形成することもできる。

【0075】図6に示す発光素子構造に上記多層光反射膜を適用した例を図8に示す。図8に示す窒化物半導体発光素子80は、n型コンタクト層13と第2のn型クラッド層21との間に第1の多層光反射膜（n型）81を、また第2のp型クラッド層41とp型コンタクト層17との間に第2の多層光反射膜（p型）82を備える。

【0076】第1の多層膜81および第2の多層膜82は、いずれも、互いに組成の異なる窒化物半導体、すなわち互いに屈折率の異なる窒化物半導体を、各層を例えば $\lambda/4n$ （ここで、 λ は活性層15からの発光光の波長、 n は屈折率）で算出される厚さで交互に2層以上積層して形成されるものであり、活性層15からの発光光をそれら膜により反射できるように設計されている。正電極19を図7に示すような形状のストライプ電極として例えば幅10μm以下に形成し、レーザ発振を行わせると、活性層15の発光光を多層膜反射膜により活性層15内に閉じこめることがより一層容易となり得るので、容易にレーザ発振できる。また、LEDモードにおいても、多層膜反射膜により発光光の漏れが抑えられ、外部量子効率が向上する。

【0077】多層光反射膜81および82には、それぞれ、ドナー不純物およびアクセプター不純物がドーピングされて所定の導電型となっている。

【0078】なお、図8に示す構造においては、第1の多層光反射膜81は、n型コンタクト層13と第2のn型クラッド層21との間に形成されているが、その代りに、これをn型コンタクト層13内に形成することもできる。同様に、第2の多層光反射膜82をp型コンタクト層17内に形成してもよい。多層光反射膜は、コンタクト層内に形成しても、活性層16からの発光光を同様に閉じ込めることができる。また、第1の多層光反射膜81および第2の多層光反射膜82のいずれかを省略し

特開2002-141553

てもよい。

【0079】また、図8に示すように、サファイアのような絶縁性材料を基板11としてレーザ素子を作製する場合、レーザ素子の構造はフリップチップ方式となる。すなわち、基板11の同一面側に、より具体的には、基板11の窒化物半導体層形成側に正、負両電極19、18を形成する構造となる。この場合、図8に示すように、n型層側に形成する第1の多層光反射膜81は、負電極18が形成されているn型コンタクト層13の水平面よりもp層側すなわち上方に位置して形成することが好ましい。第1の多層光反射膜81をn型コンタクト層13の水平面よりも基板11側に形成すると、第2のn型クラッド層21とn型コンタクト層13との屈折率の差が小さいために、活性層15からの発光が、活性層15よりも下側に位置するn型コンタクト層13中に広がってしまい、十分な光閉じこめができない場合があるからである。これは、サファイアのような絶縁性基板を使用した窒化物半導体レーザに特有の現象である。

【0080】さて、各多層光反射膜81、82を構成する2種類の窒化物半導体は、少なくとも一方がインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体（例えばIn_qGa_{1-q}N（ここで、0<q<1））またはGaNであることが好ましい。なぜなら単一層を積層して多層光反射膜とする場合、その単一層の一方をInGaNまたはGaNで形成することにより、そのInGaNまたはGaN層がバッファ層のような作用をして、もう一方の単一層にクラックが入るのを防止することができるからである。これは、InGaN層、GaN層の結晶がAlGaNに比べて柔らかいことによるものである。これに対し、多層光反射膜を例えば互いにAl組成の異なるAlGaN層により、例えば総膜厚0.5μm以上となるように多層形成すると、多層膜中にクラックが入り、素子作製が困難となる。

【0081】各多層光反射膜を構成する2種類の窒化物半導体層の最良の組み合わせは、一方を前記のようにIn_qGa_{1-q}NまたはGaNで形成し、もう一方をアルミニウムおよび/またはガリウムを含む窒化物半導体（例えば、Al_cGa_{1-c}N（ここで、0≤c<1））で形成するものがある。In_qGa_{1-q}NとAl_cGa_{1-c}Nとは屈折率の差が大きいため、これらの材料で多層光反射膜を構成することにより、発光波長に応じて反射率の大きい多層光反射膜の設計が可能となる。また、In_qGa_{1-q}Nがバッファ層として作用し得るため、Al_cGa_{1-c}N層にクラックが入ることなく10μm以上積層することができる。なお、InN、GaN、およびAlNの屈折率は、それぞれ、2.9、2.5、および2.15である。これらの屈折率はベガードの法則に従うと仮定し、組成に比例するものとして求めることができる。

【0082】図9は、本発明による窒化物半導体発光素

子のさらに他の形態の構造を示す概略断面図であって、LED素子としての構造を示す。

【0083】図9に示す窒化物半導体発光素子90は、活性層95、並びに活性層95を両側で挟んでいるn型窒化物半導体層94およびp型窒化物半導体層96からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層92およびn型コンタクト層93を介して、基板91上に設けられている。

【0084】活性層95は、図1に示す半導体発光素子10における活性層15と同様、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造（単一量子井戸構造または多重量子井戸構造）のものであり、活性層15についての上記説明は、この活性層95にもそのまま適用される。

【0085】p型窒化物半導体層96は、活性層95の第2の主面に直接接して形成された第1のp型クラッド層96aおよびこの第1のp型クラッド層96a上に形成された第2のp型クラッド層96bを含む。

【0086】第1のp型クラッド層96aは、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成されている。第1のp型クラッド層96aをアルミニウムとガリウムを含む窒化物半導体で形成すると、量子井戸構造故に不十分であり得る活性層95中の光閉じ込めがより完全なものとなり、このように第1のp型クラッド層95は活性層95中に光を閉じ込めるための良好な光ガイド層として作用することが見出された。

【0087】第1のp型クラッド層96aは、p型Al_dGa_{1-d}N（ここで、0<d<1）で形成することが最も好ましい。AlGaNは高キャリア濃度のp型のもので得られやすく、しかもInGaNを包含する活性層95に対し、バンドギャップ差および屈折率差を、他の窒化物半導体に比べて、大きくできるからである。その上、p型AlGaNは、他の窒化物半導体に比べて、成長時に分解しにくいという性質を有しており、例えば有機金属気相エピタキシャル成長法（MOVPE法）によりこれを成長させる際、下側の活性層95のInGaNの分解を抑制し、その結果として結晶性に優れた活性層95を提供し、もって発光素子の出力を向上させることとなる。

【0088】第1のp型クラッド層96aは、10オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することが好ましい。その厚さが10オングストロームよりも薄いと、第1のp型クラッド層を設けた効果が得られず、他方その厚さが1.0μmよりも厚いと、第1のp型クラッド層自体にクラックが入りやすくなるため、素子作製が難しくなる傾向にある。第1のp型クラッド層96aは、10オングストローム以上0.5μm以下の厚さを有することがさらに好ましい。

【0089】第1のp型クラッド層96aは、LED素子の場合を含めて一般的には上記範囲内の厚さを有する

- 図9 -

特開2002-141553

ことが好ましいが、特にLED素子の場合には、100オングストローム以上（同様の理由から、1.0 μm 以下）の厚さを有することがさらに好ましい。その厚さが100オングストロームより薄いと、第1のp型クラッド層が光ガイド層として作用しにくくなるのである。この場合において、第1のp型クラッド層96aは、100オングストローム以上、5 μm 以下の厚さを有することが最も好ましい。

【0090】第1のp型クラッド層96a上に設けられる第2のp型クラッド層96bは、第1のp型クラッド層96aよりもバンドギャップが大きく、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成される。このようなp型窒化物半導体により第2のp型クラッド層96bを形成することにより、当該第2のクラッド層が光閉じ込め層として効果的に作用し、有効なLED素子等を提供できることがわかった。

【0091】第2のp型クラッド層96bも、第1のp型クラッド層96aの場合と同様に、高キャリア濃度のp型のものが得られやすいことから、三元混晶のp型Al_{1-x}Ga_xN（ここで、0<x<1）で形成することが最も好ましい。加えて、第2のp型クラッド層96bは、これをp型AlGa_xNで形成すると、第1のp型クラッド層とのバンドギャップの差および屈折率の差を大きくすることができるので、光閉じ込め層としてより一層効果的に作用するようになる。なお、第2のp型クラッド層96bは、第1のp型クラッド層96aよりもバンドギャップが大きいので、例えば、前者を構成するAl_{1-x}Ga_xNにおけるfの値は、後者を構成するAl_{1-x}Ga_xNにおけるeの値よりも大きい値をとる。この場合でも、できれば、これら式におけるd値およびe値は、0を超え0.6までであることが望ましく、0を超え0.4までであることがさらに望ましい。

【0092】第2のp型クラッド層96bは、その厚さに特に制限はないが、500オングストロームないし1 μm 程度の厚さを有することが好ましい。第2のp型クラッド層をこのような厚さに形成することにより、それ自体におけるクラックの発生がより少なく、従って結晶性がより良好で、しかも高キャリア濃度のp型AlGa_xN層が得られるのである。

【0093】なお、第1のp型クラッド層96aおよび第2のp型クラッド層96bは、いずれも、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ という高キャリア濃度を有するものとして提供することができる。

【0094】また、第1のp型クラッド層96aと第2のp型クラッド層96b層との間に、p型InGa_xNまたはp型Ga_xNよりなる層を100オングストロームから1 μm までの厚さに形成してもよい。この層は、光ガイド層およびバッファ層として作用する。

【0095】活性層95の第1の主面に接して設けられているn型クラッド層94は、いずれものn型窒化物半

導体で形成することができる。しかしながら、n型クラッド層94は、結晶性がより一層優れた層として形成され得ることから、Ga_xN、AlGa_xN、InGa_xN等の二元混晶、三元混晶の窒化物半導体で形成することが好ましい。特にInGa_xNまたはGa_xNによりn型クラッド層94を形成することにより、その上により一層良好な活性層95を設けることができ、発光素子の出力が格段に向上する。

【0096】n型クラッド層94は、LED素子の場合には、100オングストローム以上、1 μm 以下の膜厚で形成することが望ましい。

【0097】基板91は、図1に示す発光素子10における基板11と同様のものであり、基板11についての上記説明がこの基板91についてもそのまま適用できる。

【0098】基板92上に形成されているバッファ層92も、図1に示す発光素子10におけるバッファ層12と同様のものであり、バッファ層12についての上記説明がこのバッファ層92についてもそのまま適用できる。特別の場合には、このバッファ層92を省略することができることも同様である。

【0099】バッファ層92上に設けられているn型コンタクト層93も、図1に示す発光素子10におけるn型コンタクト層13と同様のものであり、n型コンタクト層13についての上記説明がこのn型コンタクト層93についてもそのまま適用できる。

【0100】第2のp型クラッド層96b上に設けられているp型コンタクト層97も、図1に示す発光素子におけるp型コンタクト層17と同様のものであり、p型コンタクト層17についての上記説明がこのp型コンタクト層97についてもそのまま適用できる。

【0101】n型コンタクト層93の露出表面に形成されている負電極98も、図1に示す発光素子における負電極18と同様のものであり、負電極18についての上記説明がこの負電極98についてもそのまま適用できる。

【0102】p型コンタクト層97に接続して設けられている正電極99も、図1に示す発光素子における正電極19と同様のものであり、正電極19についての上記説明がこの正電極99についてもそのまま適用できる。ただし、図9に示すLED構造において、p型コンタクト層97上には、透孔100aを有し、二酸化ケイ素等の絶縁材料で形成された電流狭窄層100が設けられており、正電極99は、この電流狭窄層100の透孔100aを通してp型コンタクト層97と接している。

【0103】さて、本発明について、図9に関し、主としてLED素子について説明したが、LED素子の場合には、電流狭窄層100を設ける必要はない。また、LED素子の場合には、第2のp型クラッド層96bを省略することもできる。さらに、LED素子の場合には、n

特開2002-141553

型クラッド層94の好ましい厚さは100オングストローム以上、1.0 μm 以下、さらに好ましくは300オングストロームないし1.0 μm となり、あるいはこのn型クラッド層94自体を省略することもできる。n型クラッド層94を省略した場合、n型コンタクト層93がクラッド層として作用し得る。LED素子の場合、図9に示す構造において、n型クラッド層94を省略し、かつ第2のp型クラッド層96bを省略し、当然電流狭窄層100をも省略し、n型コンタクト層をn型Ga_{1-x}Nで形成し、p型コンタクト層97をp型Ga_{1-x}Nで形成した構造、すなわち、インジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層を有し、その第1の主面上にn型Ga_{1-x}N層が形成され、活性層の第2の主面上にアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体層が形成され、このp型窒化物半導体上にp型Ga_{1-x}N層が形成された構造を有するものが最も好ましいLED素子構造である。これは、本発明の1つの側面による窒化物半導体発光素子に相当する。

【0104】図10は、本発明による窒化物半導体発光素子の他の形態の構造を示す概略断面図であって、図9と同様、LED素子としての構造を示す。

【0105】図10に示す窒化物半導体発光素子200は、活性層95、並びに活性層95を両側で挟んでいるn型窒化物半導体層294およびp型窒化物半導体層296からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層92およびn型コンタクト層93を介して、基板91上に設けられている。

【0106】n型窒化物半導体層294は、活性層95の第1の主面に直接接して形成された第1のn型クラッド層294aおよびこの第1のn型クラッド層294a上に形成された第2のn型クラッド層294bを含む。

【0107】第1のn型クラッド層294aは、n型Ga_{1-x}Nまたはインジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体で形成されている。第1のn型クラッド層294aをGa_{1-x}Nまたはインジウムとガリウムを含む窒化物半導体で形成すると、量子井戸構造故に不十分であり得る活性層95中の光閉じ込めがより完全なものとなり、このように第1のn型クラッド層294aは、活性層95中に光を閉じ込めるための良好な光ガイド層として作用する（LED素子の場合）ばかりでなく、当該第1のn型クラッド層がいわばバッファ層として作用してその上に形成される活性層95にクラックの発生を少なくさせ、発光素子の発光出力を増大させることができることが見い出された。

【0108】第1のn型クラッド層294aは、In_rGa_{1-r}N（ここで、0<r<1）で形成することが最も好ましい。この場合において、rの値は、上記理由と同様の理由から、好ましくは0.5まで、より好ましくは0.3まで、さらに好ましくは0.2までの値をとる。また、そのキャリア濃度も、上記理由と同様の理由

から、 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ であることが好ましい。

【0109】第1のn型クラッド層294aは、100オングストローム以上の厚さを有することが好ましい。第1のn型クラッド層294aは、100オングストローム以上の厚さに形成することにより、活性層95と以後述べる第2のn型クラッド層294bとの間のバッファ層としてより一層効果的に作用する。すなわち、第1のn型クラッド層294aを構成するInGa_{1-x}NまたはGa_{1-x}Nは、その結晶が比較的柔らかいので、第2のn型クラッド層294bと活性層293との間の格子定数不整合と熱膨張係数差によって生じる歪をより一層効果的に吸収することができ、バッファ層としてより一層有効に作用することとなる。その結果、活性層95が十分に薄いものであっても、この第1のn型クラッド層294aの存在により、活性層95、第2のn型クラッド層294b、ひいてはp型クラッド層296にクラックが入りにくくなり、それらの結晶性が良好なものとなるので、発光素子の発光出力をより一層増大させる。

【0110】第1のn型クラッド層294aは、LED素子の場合には、上記範囲内の厚さを有することが好ましいが、特にLED素子の場合には、100オングストローム以上厚さを有することが特に好ましい。その厚さが100オングストローム未満であると、光ガイド層として作用しにくくなるのである。

【0111】また、第1のn型クラッド層294aは、いずれの場合でも、1.0 μm 以下の厚さを有することが好ましい。その厚さが1.0 μm よりも厚いと、その結晶の色が黒味を帯びるとともに、多数のビットが結晶中に生成する傾向にあり、そのため、高出力のLED、LD素子を得ることが困難となり得る。

【0112】第1のn型クラッド層294aに接して設けられている第2のn型クラッド層294bは、バンドギャップが第1のn型クラッド層294aよりも大きければいずれの窒化物半導体で形成してもよく、例えば、Ga_{1-x}N、AlGa_{1-x}N等の二元混晶、三元混晶の窒化物半導体で形成することができる。このようなn型窒化物半導体により第2のn型クラッド層294bを形成することにより、当該第2のn型クラッド層294bが光閉じ込め層として効果的に作用し、有効なLED素子等を提供できることがわかった。

【0113】第2のn型クラッド層294bは、n型Al_fGa_{1-f}N（ここで、0<f<1）で形成することが最も好ましい。n型AlGa_{1-x}Nは、InGa_{1-x}Nを包含する活性層95に対し、バンドギャップ差および屈折率差を、他の窒化物半導体に比べて、大きくできるからである。この場合において、fの値は、上記理由と同様の理由から、0.6までの値をとることが好ましく、0.4までの値をとることがさらに好ましい。そのキャリア濃度も、上記理由と同様の理由から、 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$

特開2002-141553

$\sim 1 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ であることが好ましい。また第2のn型クラッド層294bとn型コンタクト層93との間に、n型InGa_Nよりなる層を設けることにより、AlGa_Nよりなる第2のn型クラッド層を良好な結晶性をもってクラックの発生を少なくして成長させることができる。

【0114】第2のn型クラッド層294bは、その厚さに特に制限はないが、500オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することが好ましい。第2のn型クラッド層294bをこの範囲内の厚さに形成することによって、クラックがない結晶性の優れた第2のn型クラッド層294bが得られるのである。

【0115】活性層95の第2の主面に接して設けられているp型半導体層（クラッド層）296は、いずれものp型窒化物半導体で形成することができる。しかしながら、p型クラッド層296は、結晶性がより一層優れた層として形成され得ることから、p型AlGa_Nで形成することが好ましい。p型AlGa_Nは、他の窒化物半導体に比べて、成長時に分解しにくいという性質を有しており、例えば有機金属気相エピタキシャル成長法（MOVPE法）によりこれを成長させる際、下側の活性層95のInGa_Nの分解を抑制し、その結果として結晶性に優れた活性層95を提供し、もって発光素子の出力を向上させることとなる。この場合において、アルミニウムの比率やキャリア濃度については、図9に示す発光素子90における第1のp型クラッド層96aおよび第2のp型クラッド層96bについて好ましいとした値をとることが同様に好ましい。

【0116】p型クラッド層296は、LED素子の場合には、100オングストローム以上、1μm以下の膜厚で形成することが望ましい。

【0117】活性層95、基板91、基板91上に形成されているバッファ層92、バッファ層92上に設けられているn型コンタクト層93、さらにはp型コンタクト層97、負電極98、正電極99および電流狭窄層100は、図9に示す発光素子に関して説明した通りのものである。

【0118】さて、本発明について、図10に関し、主としてLED素子について説明したが、LED素子の場合には、電流狭窄層100を設ける必要はない。また、LED素子の場合には、第2のn型クラッド層294bを省略することもできる。その場合、n型コンタクト層93が第2のn型クラッド層として作用する。

【0119】図11は、本発明による窒化物半導体発光素子のさらに別の形態の構造を示す概略断面図であって、図9および図10と同様、LED素子としての構造を示す。

【0120】図11に示す窒化物半導体発光素子300は、活性層95、並びに活性層95を両側で挟んでいるn型窒化物半導体層294およびp型窒化物半導体層9

6からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層92およびn型コンタクト層93を介して、基板91上に設けられている。

【0121】図11に示す発光素子300は、n型窒化物半導体層については図10に示す発光素子200におけるn型窒化物半導体層294（第1のn型クラッド層294aおよび第2のn型クラッド層294bからなる）を、p型窒化物半導体層については図9に示す発光素子90におけるp型窒化物半導体層96（第1のp型クラッド層96aおよび第2のp型クラッド層96bからなる）を適用したものであり、本発明の最も好ましい形態の形態の一つである。各半導体層その他の構成については、特にLED素子の場合に省略し得る窒化物半導体層および特にLED素子の場合の窒化物半導体層の厚さについての上記説明を含めて、図9および図10に関して説明したことがそのまま適用でき、他言を要しない。従って、図11に示す発光素子において、n型コンタクト層93をn型Ga_Nで、第2のn型クラッド層294bをn型AlGa_Nで、第1のn型クラッド層294aをn型InGa_Nまたはn型Ga_Nで、第1のp型クラッド層96aをp型AlGa_Nで、第2のp型クラッド層96bをp型AlGa_Nで、p型コンタクト層97をp型Ga_Nでそれぞれ形成し、活性層95をノンドープとすることが最も好ましい。なお、図11に示すLED素子構造の場合には、いうまでもなく、第1のn型クラッド層294aが光ガイド層、第2のクラッド層294bが光閉じ込め層、第1のp型クラッド層96aが光ガイド層、第2のp型クラッド層96bが光閉じ込め層として作用することも明らかである。また第1のp型クラッド層96aと第2のp型クラッド層96bとの間に、p型InGa_Nまたはp型Ga_Nよりなる層をバッファ層として形成してもよいし、n型コンタクト層93と第2のn型クラッド層294bとの間に、n型InGa_Nよりなる層をバッファ層として形成してもよい。

【0122】本発明の1つの側面によれば、n型窒化物半導体層とp型窒化物半導体層との間にインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層を有し、p型窒化物半導体層は、活性層と接して形成されかつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層を含み、第1のp型クラッド層は、10オングストローム以上、1.0μm以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0123】この側面による発光素子は、基本的には、図9に示す発光素子90の構造から第2のp型クラッド層96bを省略した特別の場合に該当する。この特別の場合には、さらに、図9に示す発光素子の構造からn型コンタクト層93およびn型クラッド層94のうちのいずれかを省略してもよく（n型クラッド層を94を省略した場合、n型コンタクト層93がn型クラッド層とし

特開2002-141553

て作用する)。またp型コンタクト層97をも省略してもよい。

【0124】さらにまた、この特別の場合には、図9に示す発光素子90における第2のp型クラッド層96bに相当する第2のp型クラッド層をp型Ga_{1-y}Nまたはインジウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体（好ましくは、InGa_{1-y}N）で形成することができ、これについては、図1に示す発光素子10におけるn型クラッド層14についての説明が適用できる。さらにまた、図9に示す発光素子90におけるn型クラッド層94に相当するn型クラッド層（第1のn型半導体層）に接して、すなわち第1のn型クラッド層94とn型コンタクト層93との間に、n型Ga_{1-y}Nまたはアルミニウムとガリウムとを含む第2のn型窒化物半導体（好ましくは、AlGa_{1-y}N）を設けることも好ましい。この場合については、n型Ga_{1-y}Nを含めて、図2に示す発光素子20における第2のn型クラッド層21についての説明が適用できる。

【0125】図12は、本発明による窒化物半導体発光素子のさらに別の形態の構造を示す概略断面図であって、LED素子として特に好ましい構造の一つを示している。図12の窒化物半導体発光素子は、以下述べる第1のp型クラッド層を除くと、図6に関して説明した本発明の好ましい形態にほぼ相当するといえることができる。

【0126】図12に示す窒化物半導体発光素子400は、活性層405を備え、その第1の主面上には、第1のn型クラッド層414、第2のn型クラッド層424およびn型コンタクト層403を含むn型半導体層が設けられている。加えて、活性層405の第2の主面には、第1のp型クラッド層416、第2のp型クラッド層426、第3のp型クラッド層436、および最外層としてのp型コンタクト層407を含むp型窒化物半導体層を有する。このような積層構造は、図12に示す構造では、バッファ層402を介して、基板401上に設けられている。

【0127】活性層405は、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含するものであり、当該インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体の量子並列間発光を生じさせる構造、言い換えると量子井戸構造を構成する。このような構造については、図1に示す発光素子10の活性層15に関して説明したことがすべてそのまま適用される。LED素子の場合は、活性層405は多量子井戸構造をとることが最も好ましい。

【0128】活性層405の第1の主面に接して設けられている第1のn型クラッド層414は光ガイド層として作用するものであり、インジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_{1-y}Nで形成されている。より具体的には、この第1のn型クラッド層54は、n型In_yGa_{1-y}N（ここで、0 ≤ y < 1）で形成される。すなわち、この第1のn型クラッド層414は、図

1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明したn型InGa_{1-y}Nで形成することもできるし、n型Ga_{1-y}Nで形成することもできる。図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明した理由と同様の理由から、yの値は、0 ≤ y ≤ 0.5の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは0 < y ≤ 0.3、最も好ましくは0 < y ≤ 0.2の範囲内にある。第1のn型クラッド層414のキャリア濃度も、同様の理由から、1 × 10¹⁸/cm³ ~ 1 × 10¹⁹/cm³の範囲内にあることが望ましい。第1のn型クラッド層414も、その厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層15と第1のn型クラッド層414とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましく、1 μm以下の厚さを有し得る。

【0129】第1のn型クラッド層上に設けられている第2のn型クラッド層424は、光閉じ込め層として作用するものであり、第1のn型クラッド層414よりもバンドギャップが大きく、かつアルミニウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体またはn型Ga_{1-y}Nで形成されている。このような第2のn型クラッド層424を設けることによって、第1のn型クラッド層414との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0130】この第2のn型クラッド層424は、n型Al_gGa_{1-g}N（ここで、0 < g < 1）で形成する場合には、gの値は、0 < g ≤ 0.6の範囲内にあることが好ましい。AlGa_{1-g}Nはその結晶が比較的硬く、0.6より大きいと、第1のn型クラッド層414の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。gの値は、0 < g ≤ 0.4の範囲内にあることが最も好ましい。

【0131】また、第2のn型クラッド層424のキャリア濃度は、5 × 10¹⁷/cm³ ~ 1 × 10¹⁹/cm³の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が5 × 10¹⁷/cm³よりも低いと、特にAlGa_{1-g}Nの抵抗率が高くなるので、発光素子のV_fが高くなり、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が1 × 10¹⁹/cm³よりも高いと特にAlGa_{1-g}Nの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。

【0132】第2のn型クラッド層424は、通常、50オングストローム~0.5 μmの厚さをもって形成することができる。

【0133】n型半導体層の最外層（活性層から最も離れて位置する層）として形成されている（図12では、第2のn型クラッド層424に接して形成されている）n型コンタクト層403は、n型Ga_{1-y}Nで形成されている。図1の発光素子10におけるn型コンタクト層13をn型Ga_{1-y}Nで形成することが好ましいとした理由と同

特開2002-141553

様の理由から、 n 型コンタクト層403は、 n 型Ga_{1-x}Nで形成される。その他の例えばキャリア濃度は、図1に示す発光素子10における n 型コンタクト層13の場合に好ましいとして記載した濃度であることが同様に好ましい。

【0134】活性層405の第2の面に接して設けられている第1の p 型クラッド層416は、キャップ層として作用するものであり、これまで説明してきた他の形態における第1の p 型クラッド層と同様に活性層の分解を防止して発光素子の発光出力を向上させるものである。この第1の p 型クラッド層416は、アルミニウムとガリウムを含む p 型窒化物半導体で形成されている。このような第1の p 型クラッド層416を設けることによって、より一層優れたLED素子を提供できることがわかった。

【0135】この第1の p 型クラッド層416は、好ましくは、 p 型Al_hGa_{1-h}N（ここで、 $0 < h < 1$ ）で形成される。この場合において、 h の値は、 $0 < h \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。AlGa_{1-h}Nはその結晶が比較的硬く、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。 h の値は、 $0 < h \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。

【0136】また、第1の p 型クラッド層416のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、活性層405への正孔の注入効率が低下し、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いとAlGa_{1-h}Nの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。

【0137】第1の p 型クラッド層416は、通常、500Å～0.5μmの厚さをもって形成することができる。

【0138】第1の p 型クラッド層416上に設けられている第2の p 型クラッド層426は、光ガイド層として作用し、インジウムとガリウムを含む p 型窒化物半導体または p 型Ga_{1-x}Nで形成されている。より具体的には、第1の p 型クラッド層416は、 p 型In_zGa_{1-z}N（ここで、 $0 \leq z < 1$ ）で形成することが望ましい。図3の発光素子30における第1の p 型クラッド層36に関して説明した理由と同様の理由から、 z の値は、 $0 \leq z \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは $0 \leq z \leq 0.3$ の範囲内、最も好ましくは $0 \leq z \leq 0.2$ の範囲内にある。この第1の p 型クラッド層416も同様にGa_{1-x}Nにより形成してもいわずにバッファ層として同様に作用する。また、この第1の p 型クラッド層416のキャリア濃度も、同様の理由から、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。さらに、第1のクラッド層416の厚さ

に特に制限はないが、同様の理由から、活性層405との合計で、300Å～1μm以上の厚さを有することが望ましく、1μm以下の厚さを有し得る。

【0139】第2の p 型クラッド層426上に設けられている第3の p 型クラッド層436は、光閉じ込め層として作用し、第2の p 型クラッド層426よりもバンドギャップが大きく、かつアルミニウムとガリウムを含む p 型の窒化物半導体で形成されている。このような第3の p 型クラッド層436を設けることによって、第2の p 型クラッド層426との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0140】この第3の p 型クラッド層436は、好ましくは、 p 型Al_iGa_{1-i}N（ここで、 $0 < i < 1$ ）で形成される。この場合において、 i の値は、 $0 < i \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。AlGa_{1-i}Nはその結晶が比較的硬く、 0.6 より大きいと、第2の p 型クラッド層426の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。 i の値は、 $0 < i \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。

【0141】また、第3の p 型クラッド層436のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、活性層405への正孔の注入効率が低下し、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いとAlGa_{1-i}Nの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。第3の p 型クラッド層436は、通常、500Å～0.5μmの厚さをもって形成することができる。

【0142】 p 型半導体層の最外層（活性層405から最も離れて位置する層）として形成されている（図12では、第3の p 型クラッド層436に接して設けられている） p 型コンタクト層407は、 p 型Ga_{1-x}Nで形成されている。図1の発光素子10における p 型コンタクト層17を p 型Ga_{1-x}Nで形成することが好ましいとした理由と同様の理由から、 p 型コンタクト層407は、 p 型Ga_{1-x}Nで形成される。その他の例えばキャリア濃度は、図1に示す発光素子10における p 型コンタクト層17の場合に好ましいとして記載した濃度であることが同様に好ましい。

【0143】基板401、バッファ層402、負電極408および正電極409は、それぞれ、図1に示す発光素子10における基板11、バッファ層12、負電極18および正電極19について説明した通りのものである。また、透孔440aを有する電流狭窄層440についても、図9に示す発光素子90における電流狭窄層100について説明した通りのものである。

【0144】本発明の1つの側面によれば、第1および

特開2002-141553

第2の主面を有し、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体よりなる量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して形成され、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型層、および該第1のp型層に接して設けられたp型Ga_{0.5}Nよりなる第2のp型層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。この側面による発光素子は、図9に示す発光素子90の構造から第2のp型クラッド層96bとn型クラッド層94を省略し、かつp型コンタクト層97をp型Ga_{0.5}Nで形成した特別の場合に該当する。この場合、n型コンタクト層93を最も好ましくはn型Ga_{0.5}Nで形成することができる。

【0145】図13は、量子井戸構造の活性層の井戸層の厚さを変えて本発明の種々の窒化物半導体発光素子を作製し、その発光出力（相対値）と井戸層の厚さとの関係を調べた結果をグラフで示したものである。図13からわかるように、本発明の窒化物半導体発光素子における量子井戸構造の活性層の井戸層の厚さを70オングストローム以下にすると、発光素子の発光出力が顕著に向上することがわかる。井戸層の厚さが50オングストローム以下となると、発光素子の発光出力は、さらに向上することもわかる。このような傾向は、本発明のすべての窒化物半導体発光素子について、単一量子井戸構造の活性層においても、多重量子井戸構造の活性層においても、確認されたばかりでなく、広く、活性層を挟持する2つのクラッド層の一方がp型窒化物半導体で形成され、他方がn型窒化物半導体で形成された場合にも確認された。

【0146】そこで、本発明の一側面によれば、n型窒化物半導体層とp型窒化物半導体層との間にインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する少なくとも1層の井戸層を有する量子井戸構造の活性層を備え、井戸層は、70オングストローム以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0147】図14は、多重量子井戸構造の活性層の井戸層の厚さを一定にし、障壁層の厚さを変えて本発明の種々の窒化物半導体発光素子を作製し、その発光出力（相対値）と障壁層の厚さとの関係を調べた結果をグラフとして示したものである。図14からわかるように、本発明の窒化物半導体発光素子における量子井戸構造の活性層の障壁層の厚さを150オングストローム以下にすると、発光素子の発光出力が顕著に向上することがわかる。障壁層の厚さが100オングストローム以下となると、発光素子の発光出力は、さらに向上することもわかる。このような傾向は、本発明のすべての窒化物半導体発光素子について確認されたばかりでなく、広く、活性層を挟持する2つのクラッド層の一方がp型窒化物半

導体で形成され、他方がn型窒化物半導体で形成された場合にも確認された。

【0148】図15は、図9に示す構造に類似する構造の発光素子について、第1のp型クラッド層96aの厚さを変えた場合におけるその厚さと発光出力（相対値）との関係を示すグラフである。図15は、より具体的には、図9に示す構造において、サファイア基板91上にGa_{0.5}Nバッファ層92を介してn型Ga_{0.5}Nコンタクト層93を4μmの厚さに、n型InGa_{0.5}Nクラッド層94を500オングストロームの厚さに、単一量子井戸構造のInGa_{0.5}N活性層95を20オングストロームの厚さに形成し、その上に第1のp型AlGa_{0.5}Nクラッド層96aを厚さを変えて形成し、さらにその上に第2のp型AlGa_{0.5}Nクラッド層96bを0.1μmの厚さに形成し、p型Ga_{0.5}Nコンタクト層97を1μmの厚さに形成し、負電極98を形成し、電流狭窄層100を設けることなく正電極99を形成したLED素子についてのものである。

【0149】図15に示すように、第1のp型クラッド層96aの厚さが1μmよりも厚くなると発光出力は急激に低下する傾向にある。そのような厚さになると、第1のp型クラッド層96aにクラックが入り、素子の結晶性が悪くなることによるものである。図15から、LED素子の場合には、第1のp型クラッド層96aの厚さは10オングストローム（0.001μm）以上、1μm以下の厚さが好ましいことがわかる。このような傾向は、第1のp型クラッド層をAlGa_{0.5}Nで形成する本発明の他の形態の窒化物半導体発光素子のすべてについて確認された。なお、LED素子の場合に第1のp型クラッド層の好ましい厚さが100オングストローム以上であるのは、上記の通り、別の理由による。

【0150】図16は、図10に示す構造に類似する構造の発光素子について、第1のn型クラッド層294aの厚さを変えた場合におけるその厚さと発光出力（相対値）との関係を示すグラフである。図16は、より具体的には、図10に示す構造において、サファイア基板91上にGa_{0.5}Nバッファ層92を介してn型Ga_{0.5}Nコンタクト層93を4μmの厚さに、第2のn型AlGa_{0.5}Nクラッド層294bを0.1μmの厚さに形成し、第1のn型InGa_{0.5}Nクラッド層294aを厚さを変えて形成し、さらにその上に、単一量子井戸構造のInGa_{0.5}N活性層95を20オングストロームの厚さに、p型AlGa_{0.5}Nクラッド層296を0.1μmの厚さに形成し、負電極98を形成し、電流狭窄層100を設けることなく正電極99を形成したLED素子についてのものである。

【0151】図16からわかるように、第1のn型クラッド層294aの厚さが1μmよりも厚くなると発光出力は急激に低下する傾向にある。これは第1のn型クラッド層294a自体の結晶性が悪くなり、例えば結晶が

特開2002-141553

黒くなったり、ビットが発生するためである。また第1のn型クラッド層294aの厚さが300オングストロームよりも薄くなっても、発光出力が低下する傾向にある。これはInGa_{0.9}Nよりなる第1のn型クラッド層294aがバッファ層として効果的に作用する好ましい膜厚が300オングストローム以上であることを示している。このような傾向は、第1のn型クラッド層をInGa_{0.9}NまたはGa_{0.9}Nで形成する本発明の他の形態の窒化物半導体発光素子のすべてについて確認された。なお、既に説明したように、第1のn型クラッド層294aが100オングストロームよりも薄くなると、バッファ層として作用せず、その上に形成される活性層95およびクラッド層294b、296に多数のクラックが発生するため、素子作製も難しくなり、発光出力は大幅に低下する。

【0152】さて、本発明において、窒化物半導体は、いずれも、ドナー不純物をドーピングしないで成長させてもn型を示すが、最も好ましくは窒化物半導体の結晶成長中にSi、Ge、Te、S等のドナー不純物をドーピングする。ドナー不純物濃度を調整することにより、n型窒化物半導体層のキャリア濃度を調整できる。

【0153】また、本発明において、p型窒化物半導体層は、いずれも、窒化物半導体の結晶成長中にMg、Zn、Cd、Ca、Be、C等のアクセプター不純物を窒化物半導体の結晶成長中にドーピングすることによって得られる。このようにアクセプター不純物をドーピングして成長させた窒化物半導体層を400℃以上の温度でアニーリングを行うことによりより一層好ましいp型窒化物半導体層が得られる。アクセプター不純物の濃度を調整することにより、p型窒化物半導体層のキャリア濃度を調整することができる。

【0154】本発明の窒化物半導体発光素子は、例えばMOVPE（有機金属気相成長法）、MBE（分子線気相成長法）、HDVPE（ハイドライド気相成長法）等の気相成長法を用いて、基板上に各窒化物半導体層を形成することによって好ましく製造することができる。例えば、有機インジウム化合物、有機ガリウム化合物、有機アルミニウム化合物、アンモニア等の窒化物半導体源を用い、必要に応じて不純物源をも用いて有機MOVPE法により基板上に各窒化物半導体層を形成し、正電極および負電極を形成して本発明の窒化物半導体発光素子を製造することができる。

【0155】以上、図面を参照して本発明の実施の形態を説明したが、本発明は、これらに限定されるものではない。例えば図9における電流狭窄層100は、LD素子とした場合における本発明の半導体発光素子にも適用できる。また、1つのn型もしくはp型InGa_{0.9}N層についてのインジウムの比率およびキャリア濃度に関する説明は、他のn型もしくはp型InGa_{0.9}N層についても同様にあてはまり、1つのn型もしくはp型AlGa_{0.9}N

層についてのアルミニウムの比率およびキャリア濃度に関する説明は、他のn型もしくはp型AlGa_{0.9}N層についても同様にあてはまることが明らかであろう。なお、以上の説明からも明らかなように、主面とは、窒化物半導体層（具体的には、活性層）において他の層が形成される面を意味する。

【0156】

【実施例】以下本発明を実施例に基づいて説明する。以下の実施例では、全ての窒化物半導体層をMOVPE法により成長させている。

【0157】実施例1 まず、原料ガスとしてTMG（トリメチルガリウム）とNH₃を用い、反応容器にセットしたサファイア基板のC面に500℃でGa_{0.9}Nよりなるバッファ層を500オングストロームの厚さに成長させた。

【0158】次に温度を1050℃まで上げ、TMGとNH₃、からなる上記原料ガスにシランガスを加え、Siドーピングn型Ga_{0.9}Nよりなるn型コンタクト層を4μmの厚さに成長させた。このn型コンタクト層の電子キャリア濃度は、 $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ であった。

【0159】続いて、上記原料ガスにさらにTMA（トリメチルアルミニウム）を加え、同じく1050℃でSiドーピングn型Al_{0.9}Ga_{0.1}Nよりなる第2のn型クラッド層を0.1μmの厚さに成長させた。この第2のn型クラッド層の電子キャリア濃度は $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ であった。

【0160】次に、温度を800℃に下げ、原料ガスとしてTMG、TMi（トリメチルインジウム）、NH₃およびシランガスを加え、Siドーピングn型In_{0.9}Ga_{0.1}Nよりなる第1のn型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のn型クラッド層の電子キャリア濃度は、 $5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ であった。

【0161】続いて、原料ガスとしてTMG、TMiおよびNH₃を用い、800℃でnドーピングIn_{0.9}Ga_{0.1}Nを300オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0162】次に、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、NH₃およびCp、Mg（シクロペンタジエニルマグネシウム）を用い、Mgドーピングp型Al_{0.9}Ga_{0.1}Nよりなる第2のp型クラッド層を0.1μmの厚さに成長させた。この第2のp型クラッド層のホールキャリア濃度は $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ であった。

【0163】続いて、原料ガスとしてTMG、NH₃およびCp、Mgを用い、1050℃でMgドーピングp型Ga_{0.9}Nよりなるp型コンタクト層を0.5μmの厚さに成長させた。このp型コンタクト層のホールキャリア濃度は $5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ であった。

【0164】しかる後、温度を室温まで下げ、ウェーハ

特開2002-141553

を反応容器から取り出し、700℃でウェーハのアニーリングを行って各p型層をさらに低抵抗化させた。次に、最上層のp型コンタクト層の表面に所定の形状のマスクを形成し、n型コンタクト層の表面が露出するまでエッチングした。n型コンタクト層の露出表面にTiとAlよりなる負電極を形成し、p型コンタクト層の表面にNiとAuよりなる正電極を形成した。

【0165】電極形成後、ウェーハを350μm角のチップに分離した後、常法に従い半値角15度の指向特性を持つLED素子とした。このLED素子はIf（順方向電流）20mAにおいて、Vf（順方向電圧）3.5V、発光ピーク波長415nmの青色発光を示し、発光出力は6mWであった。また、その発光スペクトルの半値幅は20nmであり、非常に色純度の良い発光を示した。

【0166】実施例2実施例1と同様にしてサファイア基板の上にSiドープn型Al_{0.1}Ga_{0.9}N層よりなる第2のn型クラッド層まで成長させた後、第2のクラッド層の上に実施例1と同様の条件で、ノンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nを40オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0167】次に、活性層の上に、原料ガスとしてTMG、TMI、NH₃およびCp₂Mgを用い、800℃で、Mgドープp型In_{0.05}Ga_{0.95}Nよりなる第1のp型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のp型層のアニーリング後のホールキャリア濃度は $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ であった。

【0168】これ以降の第2のp型クラッド層、p型コンタクト層の成長、その他は実施例1と同様にして所望のLED素子を得た。このLED素子は、If 20mAにおいて、Vf 3.5V、発光ピーク波長410nm、発光スペクトルの半値幅20nmであり、発光出力は5mWであった。

【0169】実施例3実施例1と同様にして、サファイア基板の上に、Siドープn型In_{0.05}Ga_{0.95}Nよりなる第1のn型クラッド層まで成長させた後、その第1のn型クラッド層の上に、ノンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nを40オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0170】続いて、原料ガスとしてTMG、TMI、NH₃およびCp₂Mgを用い、800℃で、Mgドープp型In_{0.05}Ga_{0.95}Nよりなる第1のp型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のp型クラッド層のアニーリング後のホールキャリア濃度は $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ であった。

【0171】次に、実施例1と同様にして、第1のp型クラッド層上にMgドープp型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nよりなる第2のp型クラッド層を成長させ、そしてその上にMgドープp型GaNよりなるp型コンタクト層を成長させた。その後、実施例1と同様にして、所望のLED

素子を得た。このLED素子は、If 20mAでVf 3.5V、発光ピーク波長410nm、発光スペクトルの半値幅20nmであり、発光出力は6mWであった。

【0172】実施例4実施例1と同様にして、サファイア基板の上に、Siドープn型Al_{0.1}Ga_{0.9}N層よりなる第2のn型クラッド層まで成長させた後、その第2のn型クラッド層の上に、Siドープn型GaNよりなる第1のn型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のn型クラッド層の電子キャリア濃度は $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ であった。

【0173】次に、実施例3と同様に第1のn型クラッド層55の上に、ノンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nを40オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0174】次に、活性層の上に、実施例1と同様にして、Mgドープp型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nよりなる第2のp型クラッド層とMgドープp型GaNよりなるp型コンタクト層を順次成長させた。これ以降は実施例1と同様にしてLED素子を得た。このLED素子は、If 20mAでVf 3.5V、発光ピーク波長415nm、発光スペクトルの半値幅20nmであり、発光出力は5mWであった。

【0175】実施例5活性層をIn_{0.05}Ga_{0.95}Nで形成した以外は実施例1と同様にしてLED素子を作製した。このLED素子は、If 20mAにおいて、Vf 3.5V、発光ピーク波長455nm、半値幅20nmの青色発光を示し、発光出力は5mWであった。

【0176】実施例6本実施例は、活性層の形成以外は実施例1と同様に行った。すなわち、本実施例では、活性層を形成するために、原料ガスとしてTMG、TMIおよびNH₃を用い、800℃で、ノンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}N薄層（井戸層）を20オングストロームの厚さに成長させた。続いて、In_{0.05}Ga_{0.95}N薄層（障壁層）を20オングストローム厚さに成長させた。この操作を交互にそれぞれ3回ずつ繰り返し、最後にIn_{0.05}Ga_{0.95}N薄層（障壁層）を20オングストロームの厚さに成長させ、総膜厚140オングストロームの多量量子井戸構造の活性層を形成した。こうして得られたLED素子は、If 20mAにおいて、Vf 3.5V、発光ピーク波長420nmの青色発光を示し、発光出力は7mWであった。

【0177】実施例7アクセプター不純物源としてDE2（ジエチルジシラン）、ドナー不純物としてシランガスを用い、活性層としてSiとZnをドープした単一量子井戸構造のIn_{0.05}Ga_{0.95}N層を50オングストロームの厚さに形成した以外は実施例1と同様にしてLED素子を作製した。このLED素子はIf 20mAにおいて、Vf 3.5V、発光ピーク波長450nm、半値幅70nmの青色発光を示し、発光出力3mWであった。

特開2002-141553

【0178】実施例8 実施例1の手法に従い、 n 型コンタクト層の上に Si ドープ n 型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ よりなる第1の n 型クラッド層、 In ドープ $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ よりなる活性層、 Mg ドープ p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第2の p 型クラッド層、および Mg ドープ p 型 GaN よりなる p 型コンタクト層を成長させた。すなわち、第2の n 型クラッド層を形成しなかった以外は実施例1と同様にしてLED素子を得た。このLED素子は、 I_f 20mAにおいて、 V_f 3.5V、発光ピーク波長410nm、発光出力は5mWであった。

【0179】実施例9 実施例1と同様にして、サファイア基板の上に、 n 型コンタクト層までの各半導体層を成長させた後、温度を800℃に下げ、原料ガスとしてTMG、TMI、 NH_3 、およびシランガスを用い、 Si ドープ n 型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ よりなる薄膜を380オングストロームの厚さに成長させた。次に、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、 NH_3 、およびシランガスを用い、 Si ドープ n 型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなる薄膜を390オングストロームの厚さに成長させた。これらの操作を20回繰り返して、 Si ドープ n 型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 層と Si ドープ n 型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 層を交互に10層ずつ積層した n 型多層膜（第1の多層反射膜）を形成した。

【0180】次に、 n 型多層膜上に、実施例3と同様にして、第2の n 型クラッド層、第1の n 型クラッド層、活性層、第1の p 型クラッド層、および第2の p 型クラッド層を順次成長させた。

【0181】次に、温度を800℃に設定して、原料ガスとしてTMG、TMI、 NH_3 、および Cp 、 Mg を用い、第2の p 型クラッド層上に Mg ドープ p 型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 層を380オングストロームの厚さに成長させた後、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、 NH_3 、および Cp 、 Mg ガスを用い、 Mg ドープ p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層を390オングストロームの厚さに成長させた。これらの操作を繰り返して、 Mg ドープ p 型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 層と Mg ドープ p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層とを交互に10層ずつ積層した p 型多層膜（第2の多層反射膜）を形成した。

【0182】ついで、 p 型多層膜上に、実施例1と同様にして、 p 型コンタクト層を成長させた。

【0183】こうして得られたウエーハについて、実施例1と同様にして窒化物半導体層をエッチングした後、最上層である p 型コンタクト層の表面に所定の形状のマスクを形成し、 n 型コンタクト層上に50 μm の幅で負電極を、 p 型コンタクト層上に10 μm の幅で正電極をそれぞれ形成した。このように n 型コンタクト層上に n 型多層膜を形成すると、負電極を形成する水平面が n 型多層膜よりも下、すなわち基板側となる。

【0184】次に、窒化物半導体層を形成していない方のサファイア基板面を研磨して基板の厚さを90 μm に

し、サファイア基板表面のM面（六方晶系において六角柱の側面に相当する面）をスクライプした。スクライプ後、ウエーハを700 μm 角のチップに分割し、ストライプ型のLED素子を作製した。このLED素子は、ストライプ状の正電極と直交する窒化物半導体層面を光共振面としている。また、このLED素子の表面は、各電極表面を除き表面を SiO_2 よりなる絶縁膜（図示せず）で被覆されている。次に、このチップをヒートシンクに設置し、各電極をワイヤーボンディングした後、常温でレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度1.5 kA/cm^2 で発振波長390nmのレーザ発振が確認された。

【0185】実施例10 まず、原料ガスとしてTMGと NH_3 とを用い、反応容器にセットしたサファイア基板のC面に、500℃で、 GaN よりなるバッファ層を200オングストロームの厚さに成長させた。

【0186】次に、温度を1050℃まで上げ、TMGと NH_3 との原料ガスにシランガスを加え、 Si ドープ n 型 GaN よりなる n 型コンタクト層を4 μm の厚さに成長させた。

【0187】ついで、温度を800℃に下げ、上記原料ガスにさらにTMIを加え、 Si ドープ n 型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ よりなる第1の n 型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。

【0188】続いて、800℃で、第1の n 型クラッド層上に In ドープ $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ を20オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0189】次に、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、 NH_3 、および Cp 、 Mg を用い、 Mg ドープ p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第1の p 型クラッド層を0.1 μm の厚さに成長させた。

【0190】ついで、1050℃で、 Mg ドープ p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第2の p 型クラッド層を0.5 μm の厚さに成長させた。

【0191】引き続き、1050℃で Mg ドープ GaN よりなる p 型コンタクト層を1.0 μm の厚さに成長させた。

【0192】反応終了後、温度を室温まで下げ、ウエーハを反応容器から取り出し、700℃でウエーハのアニーリングを行い、 p 型層をさらに低抵抗化させた。次に、最上層の p 型コンタクト層から n 型コンタクト層の表面が露出するまでエッチングした。エッチング後、 p 型コンタクト層の表面に SiO_2 の層を被覆し、これに透孔を設けて電流狭窄層とし、さらにその電流狭窄層上に、 p 型コンタクト層と透孔を介して接続する Ni と Au よりなる正電極を形成した。また、 n 型コンタクト層の上記露出表面に、 Ti と Al よりなる負電極を形成した。

【0193】次に、窒化物半導体層を形成していない方のサファイア基板面を研磨して基板の厚さを90 μm と

特開2002-141553

し、サファイア基板のM面をスクライブして強制的に劈開し、レーザチップを得た。その劈開面に誘電体多層膜を設けた後、チップをヒートシンクに設置し、常温でレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度 2.0 kA/cm^2 で発振波長 450 nm のレーザ発振が確認された。

【0194】実施例11 実施例10と同様にして、サファイア基板上にGa_{0.9}N_{0.1}バッファ層を200オングストロームの厚さに、n型Ga_{0.9}N_{0.1}よりなるn型コンタクト層を4 μm の厚さに順次形成した。

【0195】次に、Siドープn型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第2のn型クラッド層を0.5 μm の厚さに形成した後、Siドープn型In_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第1のn型クラッド層71を500オングストロームの厚さに形成した。

【0196】次にノンドープIn_{0.2}Ga_{0.8}Nを20オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成し、その上にMgドープp型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第2のp型クラッド層を0.5 μm の厚さに、ついでMgドープp型Ga_{0.9}Nよりなるp型コンタクト層を1 μm の厚さに形成した。

【0197】これ以降は実施例10と同様にして、得られたLED素子のレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度 2.0 kA/cm^2 で発振波長 450 nm のレーザ発振が確認された。

【0198】実施例12 実施例10と同様にして、サファイア基板上にGa_{0.9}N_{0.1}バッファ層を200オングストロームの厚さに、n型Ga_{0.9}N_{0.1}よりなるn型コンタクト層を4 μm の厚さに順次形成した。

【0199】次に、Siドープn型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第2のn型クラッド層を0.5 μm の厚さに形成した後、Siドープn型In_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第1のn型クラッド層を0.1 μm の厚さに形成した。

【0200】ついで、ノンドープIn_{0.2}Ga_{0.8}NNを20オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成し、その上にMgドープp型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第1のp型クラッド層を0.1 μm の厚さに成長させ、さらにMgドープp型Al_{0.5}Ga_{0.5}Nよりなる第2のp型クラッド層を0.5 μm の厚さに成長させ、最後にMgドープp型Ga_{0.9}Nよりなるp型コンタクト層を0.5 μm の厚さに成長させた。

【0201】これ以降は実施例10と同様にして、得られたLED素子のレーザ発振を試みたところ、実施例10および11のLED素子のしきい値電流密度よりも低いしきい値電流密度 1.0 kA/cm^2 で発振波長 450 nm のレーザ発振が確認された。

【0202】実施例13 この実施例は、第1のn型クラッド層および活性層の形成を除き、実施例12と同様に

行った。すなわち、第1のn型クラッド層として、Siドープn型In_{0.5}Ga_{0.5}Nの代わりに、Siドープn型Ga_{0.9}N層を0.1 μm の厚さに成長させた。また、活性層を形成するために、ノンドープIn_{0.2}Ga_{0.8}N井戸層を30オングストロームの厚さに成長させ、その上にノンドープIn_{0.2}Ga_{0.8}N_{0.2}N_{0.8}障壁層を50オングストロームの厚さに成長させるという操作を繰り返し、井戸層/障壁層/井戸層/障壁層/井戸層という5層構成で総厚190オングストロームの多重量子井戸構造の活性層を成長させた。

【0203】得られたLED素子について、実施例10と同様にしてレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度 0.9 kA/cm^2 で500nmのレーザ発振を示した。

【0204】実施例14 第1のp型クラッド層を形成した後、第2のp型クラッド層を形成することなくp型コンタクト層を形成した以外は実施例10と同様にして、サファイア基板上にp型コンタクト層までの各半導体層を成長させた。得られたウエーハについて、実施例10と同様に、アニーリングによるp型窒化物半導体層の低抵抗化、およびp型コンタクト層からn型コンタクト層までのエッチングを行った後、p型コンタクト層上に、電流狭窄層を形成することなく、NiとAuよりなる正電極を直接形成し、n型コンタクト層の露出表面にTiとAlよりなる負電極を形成した。こうして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、If20mAにおいて、Vf3.5V、発光波長450nmの青色発光を示し、発光出力は6mWであった。また、発光スペクトルの半値幅は20nmとシャープなバンド間発光を示した。

【0205】実施例15 実施例10と同様にして、サファイア基板上にp型コンタクト層までの各半導体層を成長させた。得られたウエーハについて、実施例10と同様に、アニーリングによるp型窒化物半導体層の低抵抗化、およびp型コンタクト層からn型コンタクト層までのエッチングを行った後、p型コンタクト層上に、電流狭窄層を形成することなく、NiとAuよりなる正電極を直接形成し、n型コンタクト層の露出表面にTiとAlよりなる負電極を形成した。こうして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、If20mAにおいて、Vf3.5V、発光波長450nmの青色発光を示し、発光出力は6mWと高出力であった。発光スペクトルの半値幅は20nmとシャープなバンド間発光を示した。

【0206】実施例16 実施例10と同様にして、サファイア基板上に、Ga_{0.9}N_{0.1}バッファ層を200オングストロームの厚さに、n型Ga_{0.9}N_{0.1}よりなるn型コンタクト層を4 μm の厚さに順次形成した。このn型コンタクト層は、本実施例のLED素子において第1のn型クラッド層としても作用する。

特開2002-141553

【0207】次に、n型コンタクト層の上に、ノンドープIn_{0.2}Ga_{0.8}Nを300Åの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0208】について、Mgドープp型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nよりなる第1のp型クラッド層を0.05μmの厚さに成長させ、その上にMgドープp型Ga_{0.5}Nよりなるp型コンタクト層を0.5μmの厚さに直接成長させた。

【0209】しかる後、実施例14と同様にして、アニーリングによるp型窒化物半導体層の低抵抗化、およびp型コンタクト層からn型コンタクト層までのエッチングを行った後、p型コンタクト層上にNiとAuよりなる正電極を直接形成し、n型コンタクト層の露出表面にTiとAlよりなる負電極を形成した。こうして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、1f20mAにおいて、Vf3.5V、発光波長450nmの青色発光を示し、発光出力も7mWと高出力であった。発光スペクトルの半値幅は、20nmとシャープなバンド間発光を示した。

【0210】実施例17活性層としてIn_{0.4}Ga_{0.6}Nを500Åの厚さに成長させた以外は実施例16と同様の操作によりLED素子を得た。このLED素子は、このLED素子は、1f20mAにおいて、Vf3.5V、発光波長520nmの緑色発光を示し、発光出力は4mWであり、発光スペクトルの半値幅は、40nmであった。

【0211】実施例18活性層および第1のp型クラッド層の形成以外は実施例3と同じ操作を行ってLED素子を得た。すなわち、本実施例では、活性層を形成するために、第1のn型クラッド層上に井戸層としてノンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}Nを250Åの厚さに成長させ、その上に障壁層としてノンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}Nを500Åの厚さに成長させるという操作を13回繰り返す、最後に井戸層としてノンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}Nを250Åの厚さに成長させ、総厚1000Åの多重量子井戸構造の活性層を形成した。また、第1のp型クラッド層として、Al_{0.5}Ga_{0.5}Nを500Åの厚さに成長させた。こうして得られたウェーハについて実施例9と同様の処理を行って所望のLED素子を得た。このLED素子は、しきい値電流密度1.0kA/cm²で415nmのレーザ発振を示した。

【0212】実施例19活性層の形成以外は実施例3と同じ操作を行ってLED素子を得た。すなわち、本実施例では、活性層を形成するために、第1のn型クラッド層上に井戸層としてノンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}Nを250Åの厚さに成長させ、その上に障壁層としてノンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}Nを500Åの厚さに成長させるという操作を

26回繰り返す、最後に井戸層としてノンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}Nを250Åの厚さに成長させ、総厚1975Åの多重量子井戸構造の活性層を形成した。こうして得られたウェーハについて実施例9と同様の処理を行って所望のLED素子を得た。このLED素子は、室温、しきい値電流密度1.0kA/cm²で415nmのレーザ発振を示した。

【0213】実施例20実施例16で得た青色LED素子と、実施例17で得た緑色LED素子と、従来のGaAs系材料またはAlInGaP系の材料よりなる発光出力3mW、660nmの赤色LEDとのそれぞれ一個づつを1ドットとする256×256画素のフルカラーLEDディスプレイを作製したところ、その白色の面輝度は1万cdであり、しかも色再現領域はテレビよりも広がった。

【0214】

【発明の効果】以上詳述したように、本発明によれば、発光出力が高く、発光スペクトルの半値幅が狭い窒化物半導体発光素子が提供される。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図2】本発明による窒化物半導体発光素子の他の形態の構造を示す概略断面図。

【図3】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図4】本発明による窒化物半導体発光素子の他の形態の構造を示す概略断面図。

【図5】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図6】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図7】本発明の窒化物半導体レーザ素子の構造の一例を示す斜視図。

【図8】本発明の窒化物半導体レーザ素子の他の構造を示す概略断面図。

【図9】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図10】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図11】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図12】本発明による窒化物半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図。

【図13】本発明の窒化物半導体発光素子における活性層の井戸層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

【図14】本発明の窒化物半導体発光素子における活性層の障壁層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示す

特開2002-141553

グラフ図。

【図15】本発明の窒化物半導体発光素子におけるp型AlGaInクラッド層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

【図16】本発明の窒化物半導体発光素子におけるn型InGaInクラッド層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

【符号の説明】

11、91、401…基板

13、93、403…n型コンタクト層

14、21、34、54、501、94、294、294a、294b、414、412…n型クラッド層

15、95、405…活性層

16、36、41、56、502、96、96a、96b、296、416、426、436…p型クラッド層

17、97、407…p型コンタクト層

18、98、408…負電極

19、99、409…正電極

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.